

Report, Published Version

Grollius, Walter

**Der Semikataran als Grundlage eines neuen Behälter-
Transportsystems für Binnenwasserstraßen :
[Schlußbericht für den Zeitraum: 01.05.2001 bis
30.04.2003]; Teil 1: Propulsionstechnische und ergänzende
hydrodynamische Untersuchungen für den Einsatz auf dem
Rhein und im Kanalnetz**

VBD-Bericht

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107270>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

VBD - Europäisches Entwicklungszentrum für Binnen- und Küstenschifffahrt (Hg.) (2003): Der Semikataran als Grundlage eines neuen Behälter-Transportsystems für Binnenwasserstraßen : [Schlußbericht für den Zeitraum: 01.05.2001 bis 30.04.2003]; Teil 1: Propulsionstechnische und ergänzende hydrodynamische Untersuchungen für den Einsatz auf dem Rhein und im Kanalnetz. Duisburg: VBD - Europäisches Entwicklungszentrum für Binnen- und Küstenschifffahrt e.V. (VBD-Bericht, 1670).

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

VBD- Europäisches Entwicklungszentrum
für Binnen- und Küstenschifffahrt
Name der Forschungsstelle(n)

12891 / 4
AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.05.2001 bis 30.04.2003
Bewilligungszeitraum

Schlußbericht für den Zeitraum : 01.05.2001 bis 30.04.2003

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

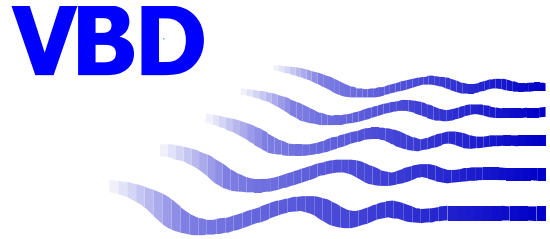
Forschungsthema :

„Der Semikatamaran als Grundlage eines neuen Behälter-Transportsystems
für Binnenwasserstraßen“

Teil 1: Propulsionstechnische und ergänzende hydrodynamische Untersuchungen für
den Einsatz auf dem Rhein und im Kanalnetz

Duisburg, den 11.06.2003
Ort, Datum


Unterschrift der/des Projektleiter(s)



**Europäisches Entwicklungszentrum für Binnen- und Küstenschifffahrt
Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Duisburg**

**Der Semikatamaran als Grundlage eines neuen Behälter-
Transportsystems für Binnenwasserstraßen**

**Bericht 1670
Juni 2003**

Teil 1: Propulsionstechnische und ergänzende hydrodynamische Untersuchungen für den Einsatz auf dem Rhein und im Kanalnetz

**Auftraggeber: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
,Otto von Guericke' e.V., Köln**

Kurzfassung

Die Bedeutung der Binnenschifffahrt innerhalb des Container-Hinterlandverkehrs hat besonders im Einzugsgebiet des Rheins und seiner Nebenflüsse in den letzten Jahren vermehrt zugenommen. Die in jüngerer Zeit zu beobachtende Neubau-Entwicklung zeigt, daß der Trend zu einer stärkeren Spezialisierung der Container-Schiffe geht, um den sehr unterschiedlichen Fahrwasserverhältnissen im Einsatzgebiet verstärkt Rechnung tragen zu können.

Ein besonderes Problem der konventionellen Einrumpfschiffe ist die auf flachem Wasser eng begrenzte Höchstgeschwindigkeit, die - physikalisch bedingt - den Einsatz der Binnenschiffe bisher auf nicht-zeitkritische Container-Transporte beschränkte. Die vorhandene Bedarfslücke bezüglich schnellerer Fahrzeuge konnte prinzipiell noch nicht geschlossen werden.

Ein erfolgversprechendes Konzept stellt das Prinzip des Semikatamarans dar, der bereits früher in der VBD in seinen Grundzügen untersucht worden ist (*Grollius und Heuser, 1992*). Dieser Schiffstyp zeichnet sich durch ein günstiges Propulsionsverhalten aus und besitzt Fahreigenschaften, die im unterkritischen Bereich höhere Spitzengeschwindigkeiten erwarten lassen als vergleichbare Einrumpfschiffe.

Die vorliegende Untersuchung setzte sich das Ziel, die Formgebung des ursprünglichen Typs weiter zu verbessern und mit der Entwicklung eines kanalgängigen Fahrzeugs ($L_{OA} = 60, 85$ und 110 m, $B = 11,4$ m) und eines für die Streckenfahrt auf dem Rhein geeigneten Fahrzeugs ($L_{OA} = 118$ m, $B = 22,8$ m) zwei Entwürfe zu entwickeln, die die Voraussetzungen zum Erreichen höherer Spitzengeschwindigkeit erfüllen. Dieses Ziel konnte weitgehend erreicht werden.

In der in größerer Breite durchgeführten Grundsatzuntersuchung konnten die Zusammenhänge zwischen den strömungstechnischen und den geometrischen Besonderheiten der neuen Schiffsform zu einem großen Teil geklärt werden. Danach bestimmen die Hauptspantabmessungen, insbesondere die Höhenlage des Mittelrumpfbodens die Spitzengeschwindigkeit, wobei der Semikatamaran zwischen dem Einrumpfschiff als dem langsamsten und dem „echten“ Katamaran als dem schnellsten Fahrzeug einzuordnen ist. Insofern stellt der Semikatamaran einen Kompromiß zwischen beiden dar. Die Besonderheit besteht jedoch in der degressiven, asymptotischen Charakteristik der Geschwindigkeit als Funktion der Mittelrumpfhöhenlage. Die Spitzengeschwindigkeit kann dementsprechend relativ hoch angesetzt werden, ohne daß - verglichen mit dem Einrumpfschiff - wesentliche Verluste an Tragfähigkeit entstehen.

Die unter dem Gesichtspunkt der Umweltverträglichkeit durchgeführten Wellen- und Bodendruckmessungen zeigen, daß der Semikatamaran sich hinsichtlich der Wellenbildung ähnlich wie ein Einrumpfschiff gleicher Abmessungen verhält. Bodendrucke und Mittschiffsmulde sind jedoch schwächer ausgebildet. Dies könnte u.a. besonders für den Einsatz des Semikatamarans in der Kanalfahrt sprechen, wo beide Größen einen maßgeblichen Einfluß haben.

Die durchgeführte Optimierung, die zu einer neuen Formgebung des Semikatamarans führte, basierte im wesentlichen auf einer erfolgreichen Anwendung der klassischen „Wollfadentechnik“ in Verbindung mit Unterwasseraufnahmen. In einer rechnerischen Simulation wurden die versuchstechnisch erzielten Stromlinienbilder nachgebildet, wobei ein Finite-Volumen-Löser eingesetzt wurde, der auf einem Euler-Ansatz mit unstrukturiertem Gittermodell basiert¹. Die beeindruckende visuelle Übereinstimmung der Bilder gibt Anlaß zu der berechtigten Hoffnung, die rechnerische Simulationstechnik in zukünftigen Optimierungsaufgaben erfolgreich einsetzen zu können.

¹ Dank gilt an dieser Stelle Herrn Dipl.-Ing. N. Stuntz, der die begleitenden Rechnungen durchführte.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Entwicklungsstand und Ausblick
3. Zielsetzung
4. Theoretische Grundlagen, Definitionen
 - 4.1 Spezifische Größen
 - 4.2 Wirkungsgrade
 - 4.3 Maßstabseffekt
 - 4.4 Bodendruck und Oberflächenverformung
5. Untersuchungskonzept, Modelle und Randbedingungen
6. Versuche
7. Auswertung
8. Entwurf + Formvariation "Kanalschiff"
 - 8.1 Systematik
 - 8.2 Beschreibung der Formvarianten
 - 8.3 Ergebnisse der Hauptspant-Variation
 - 8.4 Festlegung der Hauptspant-Abmessungen
 - 8.5 Ergebnisse der Seitenrumpf-Variation
 - 8.6 Ergänzungen
 - 8.7 Serienversuche
9. Entwurf + Formvariation "Rheinschiff"
 - 9.1 Systematik
 - 9.2 Beschreibung der Formvarianten
 - 9.3 Das Strömungsproblem des 2-Schraubers
 - 9.4 Ergebnisse der Formvariation
 - 9.5 Ergänzungen
 - 9.6 Serienversuche
10. Vergleich mit anderen Fahrzeugen
11. Wellen und Bodendruck
 - 11.1 Auswertung
 - 11.2 Ergebnisse
 - 11.2.1 Vergleich Kanalschiff - Rheinschiff
 - 11.2.2 Vergleich mit anderen Fahrzeugen
12. Theoretische Berechnungen
13. Symbolverzeichnis
14. Literaturverzeichnis

1. Einleitung

Die Entwicklung des weltweiten Container-Verkehrs zeichnet sich durch hohe Wachstumsraten aus und wird sich auch mit großer Wahrscheinlichkeit - mittelfristig gesehen - in gleichbleibendem Maße fortsetzen. Zwangsläufig nimmt damit auch die Größe der seegehenden Transportfahrzeuge weiter zu. Mit dem Einsatz einer neuen Generation von Jumbo-Containerschiffen werden zur Zeit pro Fahrzeug bis zu ca. 7000 TEU befördert, die nach der Anlandung im Seehafen schnellstmöglich auf das Hinterland verteilt werden müssen.

Die kurzfristige Verteilung einer derartigen Menge von Containern ist eine logistisch anspruchsvolle Aufgabe, deren Lösung zukünftig nur mit einem technisch und organisatorisch hochentwickelten System unterschiedlicher Verkehrsträger - und wahrscheinlich nur im Verbund untereinander - zufriedenstellend realisiert werden kann. Zur Zeit ist diese Entwicklung noch im Aufbruch und es existieren verschiedene Teillösungen, die die Transportaufgabe des Hinterlandverkehrs mehr oder weniger gut bewältigen.

Ein hoher Anteil wird über die Straße abgewickelt. Der Grund liegt vor allem in der Flexibilität des Lkw-Verkehrs, der den Transport von-Tür-zu-Tür durchführen kann und wegen der relativ kurzen Umlaufzeiten besonders für zeitkritische Beförderungsaufgaben geeignet ist. Die Nachteile sind jedoch eine hohe Straßenbeanspruchung und erhebliche Emissionsbelastungen der Umwelt sowie schließlich auch die vergleichbar hohen Transportkosten.

Die Binnenschifffahrt im Hinterland des Seehafens Rotterdam/ EURO-PORT konnte insbesondere im Bereich der Rheinschiene in der jüngeren Vergangenheit große Marktanteile des Container-Transports für sich gewinnen, wobei erhebliche Steigerungsraten zu verzeichnen waren. Der Trend geht im wesentlichen konform mit einer Prognose des PLANCO-Instituts aus dem Jahre 1999, wonach über einen Zeitraum von 10 Jahren mit einer Verdopplung des Transportaufkommens in diesem Bereich gerechnet wird (*PLANCO, 1999*).

Weniger erfolgreich war die Binnenschifffahrt bisher jedoch im Container-Verkehr innerhalb des Kanalnetzes und auf den Rheinnebenflüssen, obwohl eine Reihe von Argumenten für den Transport mit Binnenschiffen sprechen (hohe Kapazitätsreserven der Binnenwasserstraßen, Umweltverträglichkeit, termingerechte Beförderung und günstige Transportkosten).

Die Gründe für diese unterschiedliche Entwicklung sind sehr vielfältig. Die wichtigsten lassen sich unter den Begriffen „Flottenstruktur“ und „Randbedingungen der Binnenwasserstraßen“ zusammenfassen und ergeben folgendes Bild:

Das typische konventionelle Binnenschiff ist ein Allround-Fahrzeug, das von Abmessungen, Antriebsleistung und Geschwindigkeit her auf den nicht-zeitkritischen Transport von Massengütern ausgelegt ist. Es verfügt dementsprechend über einen großen Tiefgang und eine vergleichsweise hohe Antriebsleistung, erreicht aber aufgrund der Begrenzung von Fahrwasserbreite und -tiefe nur mäßige Geschwindig-

keiten ($F_{nh} = 0,5$ bis $F_{nh} = 0,6$ auf dem Rhein, $F_{nh} = 0,35$ bis $F_{nh} = 0,4$ im Kanal). Bei der Beladung mit den relativ leichten Containern wird die Ausnutzung der vollen Tragfähigkeit nur bei entsprechend hoher Stapelung erreicht.

In diesem Zusammenhang spielen die Brückendurchfahrtshöhen auf den Binnenwasserstraßen für den Container-Transport eine besondere Rolle. Auf dem Rhein können wegen der großen Durchfahrtshöhen bis zu 4 Lagen Container gefahren werden, womit die Schiffe in der Regel auch den Konstruktionstiefgang erreichen. Große Stapelhöhen sind bei Schiffen mit relativ geringer Breite jedoch wiederum stabilitätsgefährdend und müssen sorgfältig bezüglich ihrer Schwerpunktlage überprüft werden.

Anders ist es auf den Kanälen, wo höchstens 2 Lagen - teilweise auch nur unter Ballastaufnahme - befördert werden können. Leergut ist hier generell nur in Verbindung mit Ballast zu fahren.

Die beschriebene Situation verdeutlicht, daß der Einsatz konventioneller Schiffe für den Container-Transport nicht unproblematisch ist. Interessant und aufschlußreich sind unter diesem Aspekt die neueren Entwicklungen auf dem Sektor Container-Binnenschifffahrt.

Ende der 90er Jahre wurden in den Niederlanden zwei konventionelle Containerschiffe in Dienst gestellt, die sich durch ihre besondere Größe auszeichnen. Die Schwesterschiffe „Jovi“ und „Amstrade“ mit den Abmessungen $L_{OA} = 135,0\text{ m}$ und $B = 16,84\text{ m}$ sind als 3- bzw. 2-Schrauber ausgeführt und können bei maximal 5 Container-Lagen ca. 500 TEU befördern. Die Schiffe bedienen ausschließlich Häfen entlang der Rheinschiene.

In jüngster Zeit ist in den Niederlanden eine Serie von ca. 30 Klein-Containerschiffen gebaut worden, die in Anlehnung an den alten niederländischen „Kempenaar“ unter der Bezeichnung „Neo-Kemps“ in ihren Abmessungen an das Typschiff „J. Welker“ erinnern. Diese Schiffe mit einer Länge von $L_{OA} = 80,0\text{ m}$ erreichen wegen ihrer geringeren Breite von $B = 9,5\text{ m}$ in seitlich begrenztem Fahrwasser höhere Geschwindigkeiten als Standardschiffe mit $B = 11,4\text{ m}$ und sind deshalb für den Einsatz in Kanälen besser geeignet als diese.

Die Beispiele zeigen den derzeitigen Entwicklungstrend, nämlich Einsatz von großen Schiffen auf der Rheinschiene mit relativ langen Transportwegen einerseits und von kleinen, relativ schnelleren „Kanal“-Schiffen auf den Nebenrelationen und im Kanalnetz für den Kurzstreckentransport andererseits, wobei beide Fahrzeugarten jedoch mehr oder weniger nicht-zeitkritische Transportaufgaben durchführen.

Anhand der Neuentwicklungen wird deutlich, daß der Container-Hinterlandverkehr sehr unterschiedliche Anforderungen an die Transportfahrzeuge stellt. Man kann deshalb vermuten, daß die Flotte der Containerschiffe zukünftig eine große Vielfalt verschiedener Fahrzeugtypen aufweisen wird, die vielleicht größer ist, als sie bisher aus dem Zeitalter des Massengüterverkehrs bekannt war.

Grundsätzlich konnte das Problem des zeitkritischen Container-Transports innerhalb der Binnenschifffahrt noch nicht in zufriedenstellender Weise gelöst werden, weil sich die Spitzengeschwindigkeit konventioneller Einrumpfschiffe aus physikalischen Gründen kaum oder nur unwesentlich steigern läßt. Infolgedessen besteht auf diesem Sektor noch zusätzlicher Bedarf, der sich jedoch nur durch die Entwicklung neuartiger Schiffsformen abdecken läßt.

Einen erfolgversprechenden Ansatz stellt das Prinzip des Semi-Katamarans dar, der nicht nur rein geometrisch das Bindeglied zwischen Einrumpfschiff und echtem Katamaran darstellt, sondern auch hinsichtlich Tragfähigkeit und Geschwindigkeit die Eigenschaften beider Fahrzeuge als Kompromißlösung in sich vereinigt.

Die vorliegende Studie knüpft an ein Forschungsvorhaben an, das in den frühen 90er Jahren in der VBD durchgeführt wurde und erste systematische Untersuchungen über diese neuartige, ausgesprochen flachwasserorientierte Schiffsform zum Inhalt hatte (*Grollius und Heuser, 1992*).

Die Untersuchung gliedert sich in zwei Teile

- A) *Propulsionstechnische und ergänzende hydrodynamische Untersuchungen des Semi-Katamarans für den Einsatz auf dem Rhein und im Kanalnetz*
- B) *Analyse der Wettbewerbsfähigkeit eines Containertransportes mit dem Semi-Katamaran für ausgewählte Transportrelationen auf dem Rhein und im Kanalnetz*

wovon hier nur der erste behandelt wird, während der zweite als getrennter Berichtsteil abgefaßt ist.

2. Entwicklungsstand und Ausblick

Ursprünglich entstand der Schiffstyp des Semikatamarans in den frühen 80er Jahren aus einem rein verfahrenstechnischen (einsatzorientierten) Konzept.

Man benötigte für den Transport von Trailern auf der Donau eine große, breite Schiffsplattform mit ebenem Deck, auf dem die Lkw mit eigenem Antrieb ihren Stellplatz einnehmen und wieder verlassen konnten (RO-RO-Prinzip). Für das Auf- bzw. Abfahren waren mobile Rampen vorgesehen. Dem Entwurf wurde eine Länge von $L_{OA} = 110\text{ m}$ und eine sehr große Breite von $B = 22,8\text{ m}$ zugrunde gelegt. Zur Vereinfachung von Wartungsaufgaben wurde entschieden, das Schiff aus drei demonstrierbaren Einzelrümpfen zusammenzusetzen. Um den Neigungswinkel der Auffahrampen unabhängig vom Beladungszustand näherungsweise gleich zu halten, entschied man sich für eine progressive Verdrängungscharakteristik, die man durch Verringerung des Mittelrumpftiefgangs in Relation zum Haupttiefgang erzielte. Aus bau- und montage-technischen Gründen wurde der Mittelrumpf als einfache Leichterform

konstruiert, dessen Enden gegenüber den Hauptrümpfen so weit eingezogen wurden, so daß die Berührungsflächen eben blieben.

Nach diesem Konzept wurden von der Deggendorfer Schiffswerft zwei Fahrzeuge in Doppelschrauberausführung gebaut und 1982 an den Auftraggeber, die bulgarische Speditionsfirma SO MAT, Sofia übergeben (*Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen*, 1982 und *Binnenschifffahrtsnachrichten*, 1982). Die VBD war an den Voruntersuchungen beteiligt und führte für die Werft auch Modellversuche durch.

Angeregt durch dieses Projekt führte die VBD in den darauffolgenden Jahren einen Forschungsauftrag durch, in dem die hydrodynamischen Eigenschaften des neuartigen Schiffstyps systematischer untersucht wurden (*Grollius und Heuser*, 1992). Obwohl die Merkmale der oben beschriebenen Basisform hierbei weitgehend beibehalten wurden, zeigten sich in den Ergebnissen der durchgeführten Serienversuche bereits die hydrodynamischen Vorzüge des Schiffes, die nachfolgend in der Form eines Ausblicks zusammengefaßt wiedergegeben sind.

Der Hauptunterschied zum echten Katamaran besteht darin, daß die zwischen den beiden Haupt- oder Seitenrümpfen angeordnete Verbindungsbrücke in der Form eines Leichters als sog. Mittelrumpf teilgetaucht angeordnet ist und damit zur Verdrängung beiträgt (Lastkatamaran).

Der unter dem Mittelrumpf gebildete Freiraum führt zu einer günstigen Anströmung der Propeller und damit über den verbesserten Schiffseinflußgrad zu einer erheblichen Steigerung des Propulsionsgütegrades. Die Verbesserung ist so groß, daß der Semi-Katamaran nahezu alle konventionellen Transportfahrzeuge in seinen Propulsionseigenschaften übertrifft. Der Effekt ist um so stärker, je geringer die Wassertiefe ist, so daß der Katamaran als Idealfahrzeug für die Flachwasserfahrt bezeichnet werden kann, dessen Vorzüge besonders auf Flußläufen mit mäßiger Wasserführung zum Tragen kommen.

Die günstige Umströmung führt auch zu besseren Fahrleistungen. Man kann davon ausgehen, daß sie etwa mit denen eines Einrumpf-Fahrgastschiffes vergleichbar sind (erreichbare Geschwindigkeiten im Bereich $F_{nh} = 0,7$ bis $F_{nh} = 0,8$).

Es kann angenommen werden, daß durch die günstigen Anströmverhältnisse die Ausbildung der Oberflächenwellen eher mäßig ist, so daß das Fahrzeug trotz höherer Geschwindigkeiten bezüglich Wellenschlag (Schwell) umweltverträglich bleiben dürfte.

Im Gegensatz zu Einrumpfschiffen kann die Gesamtbreite des Katamarans in einem weiten Bereich vergrößert werden, ohne daß Propulsionsnachteile befürchtet werden müssen. Bei großer Breite und der ihm eigenen progressiven Charakteristik der Verdrängungskurve ist der Semi-Katamaran besonders für den Containertransport geeignet. Es bestehen keine Stabilitätsprobleme. Ebenfalls entfällt die Notwendigkeit der Ballastaufnahme bei Container-Leertransporten auf Strecken mit Niedrigbrückendurchfahrten, da der Tiefgang bei entsprechender Auslegung nur in geringen Grenzen variiert.

3. Zielsetzung

Auf der Grundlage des oben beschriebenen Prototyps eines Semi-Katamarans war geplant, zwei unterschiedliche Fahrzeuge für den Behältertransport zu entwerfen, wovon das eine nur für die Streckenfahrt auf dem Rhein, das andere sowohl für die Kanalfahrt und für den Einsatz auf den Rheinnebenflüssen, als auch für den Einsatz auf dem Rhein selbst geeignet sein sollte. Beide Fahrzeuge, die nachfolgend abkürzend als **Rheinschiff** und als **Kanalschiff** bezeichnet werden, sollten den Fahrwasserbegrenzungen entsprechend unterschiedlich breit konzipiert werden und ihrem Einsatzzweck angepaßte, unterschiedliche Antriebe erhalten.

Im Rahmen eines ersten Bearbeitungsschritts war eine Formoptimierung vorgesehen, wobei es das Ziel war, insbesondere durch Verbesserung der kritischen Mittelrumpf-Formgebung Antriebsleistung und Tragfähigkeit zu einem kombinierten Optimum zu führen. Haupt Gesichtspunkt war hierbei jedoch, einen Schiffstyp zu entwickeln, der deutlich höhere Spitzengeschwindigkeiten erreicht als vergleichbare konventionelle Fahrzeuge. Angestrebt wurden in diesem Sinne Froudesche Tiefenzahlen in einem Bereich um $F_{nh} = 0,7$.

Im einzelnen war zu diesem Zweck eine systematische Variation der Hauptspantform, d.h. der Freiraumfläche unterhalb des Mittelrumpfes (Breite und Höhenlage) unter Einhaltung der Hauptabmessungen vorgesehen. Ebenfalls sollten geeignete konstruktive Maßnahmen entwickelt werden, die die - vom Bug des Mittelrumpfes ausgehend - in den Bodenbereich eingetragene Luft vom Antriebsbereich fernhalten. Beide Punkte hatten sich bereits in den Voruntersuchungen (1992) als wesentlich erwiesen.

Die Bewertung sollte hauptsächlich auf der Basis von Propulsionsversuchen erfolgen, da - wie in Abschn. 2 bereits angedeutet - die Vorzüge des Katamarans vor allem auf propulsionsstechnischen Besonderheiten dieser Schiffsform basieren. Ergänzend war stichpunktartig die Durchführung von Widerstandsversuchen vorgesehen, die eine eingehendere Analyse des Propulsionsverhaltens ermöglichen.

In einem zweiten Bearbeitungsabschnitt sollten dann in einer systematischen Variation von Schiffslänge, Schiffstiefgang, Wassertiefe und Fahrwasserklasse Basisdaten für die geplante Wirtschaftlichkeitsanalyse (Teilprojekt B) bereitgestellt werden.

Zusätzliche Messungen innerhalb des Strömungsfeldes (Wellen- und Bodendruckausbildung) sollten Aussagen über die Umweltverträglichkeit des neuartigen Schiffstyps sicherstellen. Hierzu wurden auch ergänzende theoretische Berechnungen der Schiffskörperumströmung eingeplant.

4. Theoretische Grundlagen, Definitionen

4.1 Spezifische Größen

Eine sehr aussagekräftige Größe zur Beurteilung der dynamischen Eigenschaften eines Schiffes ist der spezifische Widerstand, der als Verhältnis zwischen Widerstand und Schiffsgewicht in der Form

$$= \frac{R_T}{g \text{ Vol}} \quad (4.1.1)$$

auch als Gleitzahl bekannt ist.

Erweitert man in Gl. (4.1.1) Zähler und Nenner mit der Fahrgeschwindigkeit V , so erhält man die Gleitzahl in der Form der spezifischen Schleppleistung, die sich als Quotient aus Schleppleistung und Transportleistung darstellt:

$$= \frac{P_E}{g \text{ Vol } V} \quad (4.1.2)$$

Aus Gl. (4.1.2) ergibt sich die spezifische Wellenleistung, kurz auch als spezifische Leistung bezeichnet, indem man formal die Schleppleistung P_E durch die Wellenleistung P_D ersetzt. Man erhält

$$_D = \frac{P_D}{g \text{ Vol } V} \quad (4.1.3)$$

Über die Definition des Gesamtwirkungsgrades in der Form

$$_D = \frac{P_E}{P_D} = \frac{R_T}{P_D} V \quad (4.1.4)$$

läßt sich für Gl. (4.1.3) auch schreiben

$$_D = \frac{P_D}{P_D} \quad (4.1.5)$$

womit die Verbindung zwischen spezifischer Leistung und der Gleitzahl in der ursprünglichen Form von Gl. (4.1.1) hergestellt ist.

Mit Gl. (4.1.5) wird deutlich, daß die spezifische Leistung ein besonders geeignetes Kriterium für die Optimierung eines Schiffes ist, weil nicht nur der Widerstand, sondern auch die Antriebscharakteristik in diese Größe eingeht.

Die Optimierungsaufgabe eines Schiffsentwurfs im Sinne „wirtschaftlicher Betriebskosten“ ist dadurch gekennzeichnet, daß bei vorgegebener Antriebsleistung die spezifische Leistung minimiert wird.

Grundsätzlich kann man davon ausgehen, daß sich die spezifische Leistung darstellt als eine Funktion der Hauptabmessungen, der Fahrwasserbedingungen und einer in der Regel unbekannten Formfunktion F_{geom} , die die Geometrie von Schiffskörper und Antriebsorgan beinhaltet, so daß für das „Einheitsschiff“ auf flachem Wasser beispielsweise angesetzt werden kann

$$_D = f\left(\frac{B}{L}, \frac{T}{L}, \frac{h}{L}, F_{geom}\right) \quad \text{für} \quad P_D = konst. \quad (4.1.6)$$

Im Sinne der gestellten Optimierungsaufgabe läßt sich die Frage nach der besseren Schiffsform (F_{geom}) demnach nur dann exakt beantworten, wenn alle anderen Einflußgrößen im Rahmen eines Vergleichs zweier Fahrzeuge konstant gehalten worden sind.

4.2 Wirkungsgrade

Die klassische Analyse des Propulsionsversuches setzt voraus, daß auch Ergebnisse von Widerstands- und Propellerfreifahrtversuch vorliegen. Bei ummantelten Schrauben wird das System Propeller + Düse als Einheit freigefahren, während im Widerstandsversuch der Schiffskörper ohne Anhänge bzw. mit Ruder geschleppt wird. Bei dieser Vorgehensweise wird die Düse - physikalisch sinnvoll - als Vortriebsorgan betrachtet. Eventuelle geringe Einflüsse des Ruders auf die Propulsion werden dagegen vernachlässigt.

Die Wirkungsgrad-Analyse hat das Hauptziel, schiffskörper- und antriebsbedingte Einflüsse voneinander zu trennen. In diesem Zusammenhang spielen der Schiffseinflußgrad $_H$ und der Gütegrad der Anordnung (Relative Rotative Efficiency) $_R$ eine zentrale Rolle, wobei ersterer die Wechselbeziehung zwischen Sog und Nachstrom, letzterer den Ungleichförmigkeitsgrad des tangentialen Anteils der relativen Propelleranströmung im Hinterschiffsbereich beschreibt.

Ausgangspunkt der Analyse ist der Gesamtwirkungsgrad, der entsprechend Gl. (4.1.4) lautet

$$_D = \frac{P_E}{P_D} = \frac{R_T}{P_D} V \quad (4.2.1)$$

Die Schleppleistung P_E läßt sich über die Definitionen der Sogziffer

$$t = \frac{T - R_T}{T} \quad (4.2.2)$$

und der Nachstromziffer

$$w = w_T = \frac{V - V_A}{V} \quad (4.2.3)$$

die nach dem Prinzip der K_T -Identität aus dem Freifahrtversuch bestimmt wird, durch die Schubleistung des Propellers ausdrücken. Man erhält

$$P_E = R_T V = \frac{(1-t)}{(1-w)} T V_A = {}_H P_B \quad (4.2.4)$$

Mit Gl. (4.2.4) wird aus Gl. (4.2.1)

$$D = {}_H P_B \quad (4.2.5)$$

mit dem Schiffseinflußgrad

$${}_H = \frac{1-t}{1-w} \quad (4.2.6)$$

und dem Propellerwirkungsgrad für die Anordnung „hinter dem Schiff“

$${}_B = \frac{T V_A}{P_D} \quad (4.2.7)$$

Die Korrelation von ${}_B$ mit dem Propellerwirkungsgrad des Freifahrtversuches ${}_0$ ergibt sich aus der Einführung des Gütegrades der Anordnung ${}_R$ in der Form

$${}_B = {}_0 {}_R \quad (4.2.8)$$

Der Gütegrad der Anordnung leitet sich aus der allgemeinen Definition des Propellerwirkungsgrades ab:

$${}_0 = \frac{K_T}{K_Q} \frac{J}{2} \quad \text{mit} \quad J = \frac{V_A}{n D} \quad ; \quad K_T = \frac{T}{n^2 D^4} \quad \text{und} \quad K_Q = \frac{Q}{n^2 D^5} \quad (4.2.9)$$

Berücksichtigt man, daß wegen des angewendeten Prinzips der K_T -Identität bei der Bestimmung der Nachstromziffer den beiden Strömungszuständen „Propulsion“ und „Freifahrt“ auch gleiche Fortschrittsziffern zugrunde liegen, so können Unterschiede zwischen den Wirkungsgraden ${}_B$ und ${}_0$ nur durch unterschiedliche Momentenbeiwerte entstehen. Folglich erhält man als Bestimmungsgleichung für den Gütegrad der Anordnung aus Gl. (4.2.8) und Gl. (4.2.9)

$$R = \frac{B}{0} = \frac{K_{Q_F}}{K_Q} \quad (4.2.10)$$

Darin stellt K_Q den Beiwert des im Propulsionsversuch gemessenen Momentes, K_{Q_F} den korrespondierenden Beiwert aus dem Freifahrtversuch dar.

Damit ist die Analyse abgeschlossen. Man erhält mit Gl. (4.2.5) und Gl. (4.2.8) als Ergebnis folgende Identität

$$D = H \quad 0 \quad R \quad (4.2.11)$$

Es sei noch vermerkt, daß 0 und R unmittelbar aus dem Freifahrtversuch bestimmt werden können, während zur Darstellung von D der Widerstandsversuch und von H neben diesem auch der Freifahrtversuch benötigt wird.

4.3 Maßstabseffekt

Da der Propulsionsversuch nur nach dem Prinzip der unvollständigen Ähnlichkeit (Einhaltung des Froudeschen und Vernachlässigung des Reynoldsschen Modellgesetzes) durchgeführt werden kann, sind für eine Hochrechnung Maßstabskorrekturen erforderlich. Der Grundgedanke dieser Korrekturen besteht darin, zusätzliche reibungsbedingte Belastungen, die an Modell und Propeller - aus der relativ überhöhten Zähigkeit des umgebenden Mediums resultierend - wirksam sind, zu kompensieren. Üblich sind die Widerstandskorrektur über den Reibungsabzug und die Korrektur des Propellerdrehmomentes mit Hilfe des Propeller- und des Düsenmaßstabsfaktors.

Für den Reibungsabzug wird der Ansatz nach ITTC57 verwendet, der sich darstellt als

$$R_A = (C_f(R'_n) - C_f(R_n) + C_A) \frac{S'}{2} V'^2 \quad (4.3.1)$$

darin

- C_f = Widerstandsbeiwert nach ITTC-Reibungskennlinie
- R'_n = Reynoldszahl des Modells
- R_n = Reynoldszahl des Schiffes
- C_A = längenabhängiger Außenhautzuschlag (hier: $0,2 \cdot 10^{-3}$)

Zur Darstellung der Maßstabsfaktoren für Propeller und Düse werden in der VBD Funktionen verwendet, die für Flachwasserschiffe empirisch über GEOSIM-Versuche ermittelt wurden (siehe auch *Sturzel, Helm und Schäle, 1959*).

Der Propellermaßstabseffekt ist als Funktion der Reynoldszahl des Propellers und des Schubbelastungsgrades in den Grenzen $1 \leq C_{Th}' \leq 10$ definiert

$$m_p = f(R_{n_p}', C_{Th}') \quad (4.3.2)$$

Der Maßstabseffekt der Düse stellt sich als Funktion des Propellerdurchmessers dar

$$m_D = f(D') \quad (4.3.3)$$

Definitionsgemäß ergibt das Produkt aus beiden Größen den Maßstabsfaktor m , mit dem das im Versuch gemessene Propellerdrehmoment zu multiplizieren ist

$$m = m_p \cdot m_D \quad (4.3.4)$$

Quantitativ bewegt sich der Maßstabseffekt in einem Bereich $m < 1$ und läßt sich durch eine Funktion des hyperbolischen Tangens abbilden, die im Grenzfall $R_n' \rightarrow R_n$ den Wert 1 annimmt. Damit entspricht die Anwendung bei der Hochrechnung einer Leistungsreduzierung.

Der Maßstabseffekt wird im Modellversuch für den Auslegungszustand (Leistungsvorgabe) bestimmt und für alle anderen untersuchten Betriebszustände konstant gesetzt. Diese pauschale Vorgehensweise entspricht der Definition der zugrunde liegenden GEOSIM-Versuchsreihe, bei der ebenfalls die Propulsionspunkte für den Hauptbetriebszustand der untersuchten Modellvarianten miteinander verglichen wurden.

4.4 Bodendruck und Oberflächenverformung

Dimensionslose Darstellung

Es soll ein Schiff auf flachem Wasser betrachtet werden. Dazu wird ein relatives, rechtsdrehendes Koordinatensystem eingeführt, dessen Ursprung in Höhe der ungestörten Wasseroberfläche auf $L/2$ liegt. Die X-Achse weist nach vorne, die Z-Achse nach oben. Das Schiff wird mit der Geschwindigkeit u_0 angeströmt.

Betrachtet man das umgebende Medium als ideale Flüssigkeit, d.h. drehungs- und zähigkeitsfrei, so handelt es sich um eine stationäre Potentialströmung, die durch eine Potentialfunktion

$$\phi = u_0 X + \phi_s \quad (4.4.1)$$

beschrieben werden kann.

Die dynamischen Eigenschaften der stationären Strömung innerhalb des betrachteten Gebietes werden durch die Bernoulli-Gleichung dargestellt, die die Energieanteile der Flüssigkeit längs einer Stromlinie verkürzt als Druckeinheiten wiedergibt.

Allgemein gilt längs einer Stromlinie $\varphi(X, Y, Z) = konst.$

$$\frac{1}{2} \rho u^2 + \rho g Z + p = const. \quad (4.4.2)$$

Darin stellt Z die örtliche Koordinate der verformten Oberfläche bezogen auf die Ruhelage $Z = 0$ dar. Insgesamt repräsentiert der zweite Term der Gleichung den geodätischen, der erste den dynamischen Druckanteil.

Die Konstante nimmt in idealer Flüssigkeit den Wert des atmosphärischen Drucks p_a an und ist im gesamten Flüssigkeitsraum identisch. In realer Flüssigkeit ist sie dagegen wegen Energieaustausches zwischen den Stromlinien veränderlich. Verschiedentlich wird zur Berücksichtigung des Effektes eine Verlustdruckhöhe Z eingeführt.

Es sollte ergänzend erwähnt werden, daß der konstante Anteil des Drucks aus der Transportströmung u_0 und der hydrostatische Druck, der sich gegen den Auftrieb aufhebt, in Gl. (4.4.2) nicht erscheinen, so daß in dieser Darstellung tatsächlich nur die dynamischen Effekte der Strömung aus dem Einfluß des Schiffskörpers zum Ausdruck kommen.

Zur Messung von Bodendruck und Oberflächenverformung wird üblicherweise ein System von Druckmeßdosen und Wellensonden verwendet, die in einem Meßquerschnitt des Schlepptanks in verschiedenen Abständen senkrecht zur Mittellängsebene ortsfest montiert sind. Da sich das aufzumessende Strömungsfeld synchron mit dem Modell bewegt, kann es während des Modelldurchgangs durch den Querschnitt über eine kontinuierliche Aufzeichnung der zeitabhängigen Meßsignale vollständig erfaßt werden. Diese werden dann nachträglich mit Hilfe von definierten Weg-Zeitmarken in das schiffsfeste Koordinatensystem transformiert.

Aus der Differenzwertmessung, bei der die Geber vor dem Versuch auf einen Nullwert abgeglichen werden, stellen sich die Ergebnisse in Einklang mit Gl. (4.4.2) als Oberflächenverformung Z (bez. a. $Z = 0$) und Bodendruck in der Form $p = p - p_0$ (bez. a. $Z = -h$) dar.

Eine charakteristische Größe des Strömungsfeldes ist der Staudruck, der in der Form

$$p_s = \frac{1}{2} \rho u_0^2 \quad (4.4.3)$$

die Wirkung einer Punktquelle auf die Transportströmung zum Ausdruck bringt und größenordnungsmäßig auch im Bereich des vorderen Staupunktes eines Störkörpers

auftritt. Indem man beide Seiten von Gl. (4.4.2) durch diese Größe dividiert, ergeben sich die Einzelterme in dimensionsloser Form. Man erhält

für den Bodendruck den bekannten Ausdruck

$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2} \rho u_0^2} \quad (4.4.4)$$

und für die Oberflächenverformung

$$C_z = \frac{z}{\frac{2}{g} u_0^2} \quad (4.4.5)$$

Darstellung des Schwells, Definitionsmodell

Der mit der Geschwindigkeit $u_0 = -V$ angeströmte Schiffskörper erzeugt aufgrund seiner Verdrängungswirkung eine Störung der Transportströmung, die u.a. an der oberen Grenzfläche des Flüssigkeitsraumes in der Form der bekannten Oberflächenwellen sichtbar wird. In diesem Begriff sind jedoch mehrere Einzelphänomene zusammengefaßt, wobei man unter Bezugnahme auf die Ebene $Z = 0$ grundsätzlich zwischen aperiodischen und periodischen Verformungsanteilen der Oberfläche unterscheiden muß.

Der erste zeigt sich in einem relativ eng begrenzten Bereich um den Schiffskörper als schwach ausgebildete Mulde, die in der Regel eine nach außen konvex verlaufende Form besitzt. Die sogenannte „Mittschiffsmulde“ ist mit bloßem Auge kaum zu erkennen und wird erst bei ufernaher Fahrt des Schiffes durch Zurückweichen des Wassers sichtbar.

Sehr deutlich tritt dagegen der periodische Anteil in der Form der eigentlichen Oberflächenwellen in Erscheinung, die als Diagonal- und Transversalwellen neben und hinter dem Schiff verlaufen. Die Länge der Wellen ist eine Funktion der Froude-Zahl. Der Öffnungswinkel der Diagonalwellen ist der bekannte Kelvin-Winkel, der für tiefes Wasser und im unteren Geschwindigkeitsbereich auch für flaches Wasser eine konstante Größe ist ($\kappa = 19^\circ 28'$), im letzteren Fall jedoch mit Annäherung an die Stauwellengeschwindigkeit ($F_{nh} \rightarrow 1$) einen Wert von $\kappa = 90^\circ$ anstrebt, womit die Diagonalwellen verschwinden.

Typische Orte, von denen Diagonalwellen ausgehen, sind die Staupunkte an Bug und Heck. Eine besondere Rolle spielen in diesem Zusammenhang aber auch die vordere und die hintere Schulter (Bereiche mit maximaler Wasserlinienkrümmung in Vor- und Achterschiff). Sind diese sehr ausgeprägt, was bei Schiffen mit parallelem Mittelteil der Fall ist, entstehen hier massive Diagonalwellen, die aus dem übrigen Wellenbild sehr stark hervortreten und hier als „**Bug- und Heckwellenfront**“ bezeichnet werden sollen.

Durch die dynamisch bedingte geometrische Lageänderung des Schiffskörpers im Strömungsfeld (Trimm und Absenkung) wird die Wellenbildung zusätzlich beeinflusst. Insbesondere bei Flachwasserschiffen entstehen mit wachsender Geschwindigkeit bei zunehmender Absenkung und Wechsel von anfänglich kopflastigem zu hecklastigem Trimm im Hinterschiffsbereich erhöhte Übergeschwindigkeiten. Dadurch nehmen die örtlichen F_{nh} -Zahlen im Bereich der hinteren Schulter verstärkt zu, was in einem Anwachsen der Heckwellenfront zum Ausdruck kommt. Wird dabei örtlich die Stauwellengeschwindigkeit erreicht, beginnt die Heckwelle zu brechen. Man spricht dann auch vom Erscheinen der „Heckwalze“, die das Ende der möglichen Geschwindigkeitssteigerung kennzeichnet. Die angedeutete physikalische Geschwindigkeitsgrenze liegt bei üblichen kommerziell genutzten Binnenschiffen ($C_B = 0,8$ bis $C_B = 0,9$) in einem Bereich von $F_{nh} = 0,6$ bis $F_{nh} = 0,5$.

Abhängig von der Art der Fahrwasserbegrenzung treten die Ausläufer des beschriebenen Oberflächenwellensystems im Uferbereich in unterschiedlicher Intensität in Erscheinung und können hier erhebliche Schäden anrichten. Man bezeichnet das Phänomen als „Wellenschlag“ oder auch als „Schwell“.

Je nach Abstand des Schiffes vom Ufer und dessen Beschaffenheit (Flach- oder Steilufer bzw. Kanalspundwand) zeigen sich die stärksten Auswirkungen des Schwells in unterschiedlicher Form, wobei im Beobachtungsquerschnitt grundsätzlich eine Absenkung der Wasseroberfläche, überlagert von den beiden durchlaufenden Diagonalwellenfronten erscheint. Abhängig vom Schiffsabstand treten die Spitzenwerte beider Phänomene in unterschiedlichen Phasenlagen zueinander auf.

Handelt es sich um ein Flachufer, zeigen sich brechende Wellen, so daß den Hauptwellen nachfolgende Wellenfronten wegen des Energieverlustes rasch abklingen. Bei einer senkrechten Uferwandung werden jedoch Bug- und Heckwellenfront von dieser fortlaufend reflektiert (Einfallswinkel = Ausfallswinkel) und es entsteht hinter dem Schiff ein System von Kreuzwellen, das sich kaum gedämpft weit nach Unterstrom ausdehnt.

Die komplexe Struktur der Oberflächenverformung in Ufernähe läßt sich im Schlepptank mit begrenzter Länge und rechteckigem Querschnitt nicht naturgetreu nachbilden. Infolgedessen ist es zweckmäßig, für eine quantitative Beurteilung ein geeignetes Ersatzmodell zu definieren, das auf beliebige Versuche übertragbar ist.

So erscheint es sinnvoll, sich auf die Auswertung einer Wellensonde, die in der Nähe der angenommenen seitlichen Fahrwasserbegrenzung angeordnet ist, zu beschränken. Ferner wird davon ausgegangen, daß die maximale Einsenkung der Mittschiffsmulde $\bar{\eta} = \eta_M$ und die Doppelamplitude von Bug- und Heckwellenfront η_w (beim ersten Durchgang) repräsentative und reproduzierbare Maße sind, um als Vergleichsmaßstab für die Intensität des realen Wellenschlags zu dienen.

Darstellung des Bodendrucks

Der Bodendruck, in Gleichung (4.4.2) symbolisch durch p gekennzeichnet, setzt sich längs einer Bodenstromlinie aus den Änderungen der geodätischen und der dynamischen Druckhöhe zusammen und ist eine Funktion, die mit zunehmender seitlicher Entfernung vom Schiffskörper rasch abnimmt.

Für eine praktische Verwertung sind die Drücke in der Mittellängsebene interessant, denn bei losem Bodensediment kann der verstärkte Drucksprung in der Umgebung des Propellerantriebs auf flachem Wasser erhebliche Materialverschiebungen bewirken, die kostenintensive Baggerarbeiten erforderlich machen. Man spricht in diesem Zusammenhang auch recht anschaulich vom „Pflügen des Propellers“.

Die Druckkurve für den Mittellängsschnitt ist - vergleichbar mit den Längsschnitten der Oberflächenverformung - durch die Auswirkungen der Staupunkte und der Schulterbereiche in Vor- und Achterschiff geprägt. Typisch ist - von vorne gesehen - ein Verlauf mit Überdruck- und Unterdruckspitzen im Vorschiff sowie ein solcher mit umgekehrter Reihenfolge im Hinterschiff, während das parallele Mittelschiff einen fast symmetrischen Unterdruckbereich mit relativem Maximum zeigt.

Eine Auswertung beschränkt sich zweckmäßiger Weise auf die Darstellung der repräsentativen Druckspitzen auch in Hinblick auf die Darstellungsmöglichkeit der Abhängigkeit von anderen Parametern wie zum Beispiel der Wassertiefe h . Ein zusätzlicher Auswertungspunkt stellt der Fall $h \rightarrow \infty$ dar, für den die Druckdifferenz asymptotisch gegen Null geht.

5. Untersuchungskonzept, Modelle und Randbedingungen

In diesem Abschnitt wird das Untersuchungskonzept für die beiden Schiffsentwürfe hinsichtlich der Modellentwicklung und der Versuchsrandbedingungen soweit dargestellt, wie es im Rahmen der Vorplanung festgelegt werden konnte. Insbesondere ergaben sich während der Versuche jedoch weitere notwendige Entwicklungsschritte bezüglich der Formgebung, die nicht vorhersehbar waren (sog. ad-hoc-Maßnahmen) aber den Versuchsumfang vergrößerten. Diese werden in den nach Fahrzeugtyp getrennten Abschnitten 8 und 9 in chronologischer Reihenfolge abgehandelt. Dort werden auch die Details der verschiedenen Entwürfe eingehender beschrieben.

Dementsprechend ergaben sich zwangsläufig notwendige Verkürzungen des Untersuchungsumfangs in anderen Teilbereichen. So mußte beispielsweise bei dem Rheinschiff, das zeitlich im Anschluß an das Kanalschiff untersucht wurde, auf eine Variation des Hauptspantquerschnitts verzichtet werden. Statt dessen wurden die aus dem letzteren Entwurf gewonnenen diesbezüglichen konstruktiven Empfehlungen auf den Basisentwurf des Rheinschiffs übertragen.

Unter diesen Umständen mußte z.B. später festgestellt werden, daß die optimale Höhenlage des Mittelrumpfbodens, einer der wichtigsten Konstruktionsgrößen des

Semikatamarans, maßgeblich von der Gesamtbreite des Schiffes abhängt, was diese Variation eigentlich erforderlich gemacht hätte.

Unter diesen Umständen sollte bereits an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß die Zielsetzungen der vorliegenden Untersuchung hinsichtlich eines optimierten Rheinschiffentwurfs nur zu einem Teil erreicht werden konnten.

Vorplanung Kanalschiff

Im Sinne des vorgesehenen Allround-Einsatzes wurde die Schiffsbreite auf $B = 11,4$ m festgelegt, womit auch Kanäle mit Schleusen der Wasserkategorie V passiert werden können. Hinsichtlich des Tiefgangs wurde eine Variation in den Abstufungen

Bez.		$T1$	$T2$	$T3$
T	(m)	2,8	2,4	2,0

eingepplant, worin der erste Wert dem Konstruktionstiefgang, der letzte dem angenommenen Leertiefgang entspricht. Auch bezüglich der Länge war eine Variation in der Form

Bez.		$L3$	$L1$	$L2$
L_{OA}	(m)	60,0	85,0	110,0

vorgesehen. Damit sind Längen erfaßt, die auf die vorgeschriebene Besatzungsstärke Rücksicht nehmen (Laut Besatzungsordnung tritt ab Längen von $L_{OA} > 86,0$ m eine Änderung ein).

Für die Variation der Hauptspantform war eine systematische Änderung der Freiraumfläche unter dem Mittelrumpf ($h_{MR} \times B_{MR}$) unter Einhaltung von Gesamtbreite B und Tiefgang T geplant. Unter diesen Voraussetzungen war der Bau verschiedener Modelle mit unterschiedlichen Seitenrumpfbreiten notwendig. Da eine Herstellung in Sektionen vorgesehen war (Mittel- und Seitenrumpf getrennt; Unterteilung in Bug-, Heck- und parallelen Mittelteil), konnte eine Variation der Mittelrumpf-Bodenhöhe demgegenüber durch verwendete kraftschlüssige Verbindungen stufenlos eingestellt werden.

Geplant wurde der Bau von zwei Modellsätzen mit folgenden Breitenmaßen:

Bez.		$B1$	$B2$
B_{MR}	(m)	5,70	4,04
B_{MR}/B		0,500	0,354
B_{SR}	(m)	2,85	3,68
B_{SR}/B		0,250	0,323

Die Mittelrumpf-Bodenhöhe sollte ursprünglich in 3 Stufen verändert werden, wurde aber schließlich um eine 4. Stufe ergänzt, die den „echten“ Katamaran repräsentiert:

Bez.		h_{MR1}	h_{MR2}	h_{MR3}	(h_{MR4})
h_{MR}	(m)	0,5	1,0	1,5	> 2,8

Der Modellmaßstab wurde auf $\lambda = 16$ festgelegt.

Ausgehend von einer Einschrauber-Ausführung wurde als Antrieb ein ummantelter Propeller mit Z-Getriebe vorgesehen, der mittschiffs am Heck unterhalb des Mittelrumpfes positioniert werden sollte. Der Propellerdurchmesser wurde unter Berücksichtigung des Leertiefgangs von $T = 2,0 \text{ m}$ auf einen korrespondierenden Wert von $D = 1,6 \text{ m}$ festgelegt. Entsprechend dem gewählten Modellmaßstab wurde ein 4-flügliger Stockpropeller mit einem Steigungsverhältnis von $P/D = 1,052$ und einem Flächenverhältnis von $A_E/A_0 = 0,71$ ausgewählt, der als Antrieb geeignet erschien.

Entsprechend dem vorgesehenen Einsatzzweck des Schiffes wurden Modellversuche in seitlich unbegrenztem Fahrwasser (Streckenfahrt unter Rheinverhältnissen) und im sogenannten Standard-Rechteckkanal ($b_c \times h_c = 42,0 \times 4,0 \text{ m}$) eingeplant.

Im Sinne eines kontinuierlichen Versuchsschemas wurde das Schema der Wassertiefenvariation für seitlich unbegrenztes Fahrwasser auf

Bez.		$h1$	$h2$	$h3$
h	(m)	4,0	7,5	10,0

festgelegt, um zu den Kanalversuchen ($h_c = 4,0 \text{ m}$) eine Korrelation herzustellen.

Vorplanung Rheinschiff

In Anlehnung an die Voruntersuchungen zum Semikatamaran (*Grollius und Heuser, 1992*) wurde die dort verwendete Breite von $B = 22,8 \text{ m}$ beibehalten. Damit ist das Schiff in der Lage, auch die kanalisierte Rheinstrecke oberhalb von Straßburg bis Basel zu befahren, deren Schleusen auf diese Breite als Maximalwert ausgelegt sind.

Hinsichtlich der Länge wurden drei Varianten festgelegt:

Bez.		$L3$	$L1$	$L2$
L_{OA}	(m)	85,0	110,0	135,0

Tiefgangs- und Wassertiefenvariation wurde entsprechend dem Fall „Kanalschiff“ beibehalten:

Bez.		$T1$	$T2$	$T3$
T	(m)	2,8	2,4	2,0

Bez.		$h1$	$h2$	$h3$
h	(m)	4,0	7,5	10,0

Der Maßstab wurde wie vorher auf $\lambda = 16$ festgelegt.

Als Antrieb wurde das 2-Schrauber-Konzept gewählt. Die ummantelten Propeller wurden jeweils hinter den Seitenrümpfen angeordnet. Das Heck der Seitenrümpfe wurde getunnelt ausgeführt, wobei jedoch auf die Ausbildung von Tunnelschürzen verzichtet wurde. Der Propellerdurchmesser konnte dementsprechend groß gehalten werden. Es wurden zwei gegenläufige Stockpropeller vom Typ Wag. B 4.70 mit einem korrespondierenden Durchmesser von $D = 1,76$ m und einem Steigungsverhältnis von $P/D = 1,0$ eingesetzt. Der Drehsinn wurde auf den Fall „Drehen über oben nach innen“ festgelegt. Diese Variante hatte sich bereits bei der Untersuchung des Prototyps (*Grollius und Heuser, 1992*) gegenüber der Umkehrung als günstiger erwiesen.

6. Versuche

Die Versuche wurden im großen Flachwassertank der VBD durchgeführt, der eine Breite von $b = 10,0$ m besitzt. Bezogen auf den gewählten Modellmaßstab entspricht diese einer korrespondierenden Fahrwasserbreite von $b = 160$ m (= Rheinverhältnisse).

Für die Simulation der Kanalfahrt wurde das gewählte Kanalprofil maßstäblich mit Hilfe wasserfester hölzerner Schottsegmente in der Mitte des Tanks symmetrisch zur Mittellängsachse nachgebildet. Die Segmente wurden „druckdicht“ auf dem Tankboden montiert. Die neben der Kanalstrecke zu beiden Seiten verlaufenden, offenen Teilstücke des Tanks wurden im Bereich der Kanalstirnflächen ebenfalls abgeschottert, um einen Druckausgleich zu verhindern.

Im sog. Meßquerschnitt des Tanks (etwa auf halber Länge), wurde ein System von Bodendruckdosen und Wellensonden angeordnet. Die korrespondierenden Querkoordinaten, bezogen auf die Fahrspur des Modells (Mittellängsachse des Tanks), sind nachfolgend für beide Versuchsarten wiedergegeben:

Seitl. unbegr. Fahrwasser

Bez.	Dim.	Tank-Mitte	Wellensonden								seitl. Begr.
Pos.Nr.		0	1	2	3	4	5	6	7	8	
Y	(m)	-	6,4 (12,0)*	16,0	24,0	32,0	40,0	48,0	56,0	76,8	80,0
Y/(b/2)	-	-	0,08 (0,15)*	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,96	1,00
Bodendruckdosen											
Pos.Nr.		0	1	2	3	4	5	6	7	8	
Y	(m)	0,0	8,0	16,0	24,0	32,0	40,0	-	-	-	80,0
Y/(b/2)	-	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	-	-	-	1,0

Kanal

Bez.	Dim.	Tank-Mitte	Wellensonden			seitl. Begr.
Pos.Nr.		0	1	2	3	
Y	(m)	-	6,4	12,8	19,2	21
Y/(b _c /2)	-	-	0,305	0,610	0,914	1,000
Bodendruckdosen						
Pos.Nr.		0	1	2	3	
Y	(m)	0,0	3,2	11,2	19,2	21,0
Y/(b _c /2)	-	0,000	0,152	0,533	0,914	1,000

*) Die Klammerwerte stellen Alternativwerte dar und beziehen sich auf die Versuche „Rheinschiff“

Wellen- und Bodendrücke wurden bei sämtlichen Versuchen (von wenigen Ausnahmen abgesehen) dem dargestellten Schema entsprechend begleitend erfaßt.

Die Propulsionsversuche wurden nach dem Prinzip der „Englischen Propulsion“ gefahren, wobei das Modell wie beim Widerstandsversuch über ein Kraftmeßglied starr mit dem Schleppwagen gekoppelt ist. Aus mehreren Messungen mit variiertem Propellerdrehzahl während einer Meßfahrt wird der Datensatz des Propulsionspunktes durch Interpolation des Nullpunktes der zusätzlich aufgenommenen „Restkraftfunktion“ ermittelt.

Widerstandsversuche wurden in Ergänzung zu den Propulsionsmessungen stichpunktartig durchgeführt, in größerer Breite jedoch im Rahmen der Formvariation der beiden Schiffsentwürfe.

Für alle Versuche wurden Vor- und Achterschiff der untersuchten Modelle zur Strömungsvisualisierung mit aufgeklebten Wollfäden präpariert. Regelmäßig aufgenommene Unterwasser- und Seitenfotos ergänzten die Messungen.

Es muß in diesem Zusammenhang betont werden, daß die angewendete Wollfaden-technik sich als ein wichtiges Hilfsmittel der Untersuchung erwiesen hat. Sie trug wesentlich dazu bei, die untersuchten Formvarianten zielsicher zu beurteilen und hatte damit maßgeblichen Anteil am Erfolg des Vorhabens.

7. Auswertung

Propulsions- und Widerstandsversuche sind entsprechend den in den Abschnitten 4.1 und 4.2 dargestellten Zusammenhängen ausgewertet worden. Für die grafische Darstellung wurde ein umfangreicherer Standard-Diagrammsatz entwickelt, der nachfolgend näher beschrieben wird.

Der Propulsionsversuch besteht aus einer Folge von 3 Blättern, die jeweils in der geometrischen Anordnung von oben nach unten folgende Größen enthalten

Bez.	Symbol	Dim.	Formel
Propulsion/ Blatt 1			
<i>Trimmwinkel</i>		<i>W.min</i>	
<i>Absenkung</i>	Z_v	<i>m</i>	
<i>P.Drehzahl</i>	<i>n</i>	min^{-1}	
<i>Wellenleistung</i>	P_D	<i>kW</i>	
Propulsion/ Blatt 2			
<i>Ges.wirkungsgrad</i>	η	-	4.2.1
<i>Gütegr.d.Anordnung</i>	R	-	4.2.10
<i>P.wirkungsgrad</i>	η	-	4.2.9
<i>Schiffseinflußgrad</i>	H	-	4.2.6
<i>Sogziffer</i>	t	-	4.2.2
<i>Nachstromziffer</i>	W_T	-	4.2.3
Propulsion/ Blatt 3			
<i>Spez. Leistung</i>	η	-	4.1.3
<i>Wellenleistung</i>	P_D	<i>kW</i>	

Der Widerstandsversuch besteht aus einer Folge von 2 Blättern mit folgendem Inhalt (in geometrischer Anordnung von oben nach unten)

Bez.	Symbol	Dim.	Formel
Widerstand/ Blatt 1			
<i>Trimmwinkel</i>		<i>W.min</i>	
<i>Absenkung</i>	Z_v	<i>m</i>	
<i>Schleppleistung</i>	P_E	<i>kW</i>	4.1.4
Widerstand/ Blatt 2			
<i>Spez. Widerstand</i>		-	4.1.1
<i>Schleppleistung</i>	P_E	<i>kW</i>	4.1.4

Propulsions- und ergänzender Widerstandsversuch sind - soweit letzterer ebenfalls durchgeführt wurde - im Anlagenteil jeweils hintereinander angeordnet.

Auf die Art der Wellen- und Bodendruckauswertung wird in den zugehörigen Textteilen der Ergebnisdarstellung direkt Bezug genommen.

8. Entwurf + Formvariation „Kanalschiff“

8.1 Systematik

Ein wesentlicher Punkt der geplanten Untersuchung war die Variation des Hauptspants, speziell der Freiraumfläche unterhalb des Mittelrumpfes (s.a. Abschn. 5). Um den Versuchsaufwand in erträglichen Grenzen zu halten, mußte die Zahl der möglichen Variationsparameter auf eine akzeptable Höchstzahl reduziert werden. Deshalb wurde entschieden, die Untersuchung auf die mittlere Schiffslänge $L1$ ($L_{OA} = 85,0\text{ m}$), den Konstruktionstiefgang $T1$ ($T = 2,8\text{ m}$) und auf die kleinste Wassertiefe $h1$ ($h = 4,0\text{ m}$) ohne seitliche Fahrwasserbeschränkung zu begrenzen, auf der das Prinzip des Semikatamarans nach den bisherigen Erfahrungen besondere Wirkung zeigen mußte.

Bei den Versuchen kamen insgesamt 3 Formvarianten zum Einsatz, nämlich der Modell-Bausatz $B1$ ($B_{SR} = 2,85\text{ m}$) mit unterschiedlichem MR-Bug (Typ EURO-Leichter II und Typ PONTON) und der Modell-Bausatz $B2$ ($B_{SR} = 3,68\text{ m}$) mit MR-Bug Typ PONTON. Bei allen Versuchen wurde die Höhe des MR-Bodens systematisch variiert. Die Ergebnisse lieferten Kriterien für die Festlegung von SR-Breite und MR-Bodenhöhe.

Im Rahmen der Zwischenauswertung mußte jedoch anhand der begleitenden Unterwasseraufnahmen festgestellt werden, daß die Qualität der Schiffskörperumströmung relativ schlecht war. Bei der Suche nach Verbesserungsmöglichkeiten bestand Anlaß zu der Annahme, daß eine Veränderung der Seitenrumpfform eine erfolgreiche Gegenmaßnahme sein könnte. Dementsprechend wurde entschieden, unter Beibehaltung des optimierten Hauptspants weitere Formänderungen mit variiertem Ausführung von SR-Bug und -Heck zu untersuchen. Insgesamt entstanden 4 zusätzliche Formvarianten in asymmetrischer Ausführung, die im Rahmen der oben beschriebenen Systematik ergänzend getestet wurden, wobei schließlich die Strömungsqualität und damit auch das Niveau der Antriebsleistung in beachtlicher Weise verbessert werden konnte.

Anl. 1 zeigt eine Kurzübersicht über die 7 untersuchten Formvarianten einschließlich ihrer Hauptdaten. Die Variante 1A stellt eine Ergänzung dar, die keinen direkten Einfluß auf die Systematik hatte. Auf die zugehörigen Ergebnisse wird in Abschn. 8.6 näher eingegangen.

Die Anlage enthält auch eine Tabelle, die der geplanten Tiefgangsvariation der Endform (Variante 6) zugeordnet ist (siehe Abschn. 3, systematische Versuche).

Nachfolgend wird eine Beschreibung der charakteristischen Merkmale der Formvarianten einschließlich ihrer modellmäßigen Ausführung wiedergegeben.

8.2 Beschreibung der Formvarianten

Basisentwurf - Formvariante 1

Der Basisentwurf des Kanalschiffs erhielt eine Ausführung, die sich teilweise an der Formgebung des Prototyps (*Grollius und Heuser, 1992*) orientierte.

Heck und Bug der Seitenrumpfe sind symmetrisch ausgeführt und der Bug des Mittelrumpfes weist eine Rücklage gegenüber den Hauptrümpfen von 3 Bauspantabständen (entsprechend $L = 3,0\text{ m}$) auf.

Abweichend von der Entwurfsvorlage besitzt der Bug des Mittelrumpfes jedoch eine sehr völlige Form, die dem Keilspantbug des bekannten Schubleichters EUROPA II entspricht. Das Heck ist nicht vorgezogen, sondern schließt bündig mit dem Seitenrumpf ab. Die Gillungslinie weist einen S-förmigen Krümmungsverlauf auf, der sich bei Flachwasserfahrzeugen gegenüber einer geraden Linienführung bezüglich der Propellerwirkung als günstiger erwiesen hat.

Ein besonderes Merkmal des Mittelrumpfbodens ist eine schwache, unter $\beta = 6^\circ$ zu den Seiten hin verlaufende Aufkimmung (V-Form), die den Lufteintrag vom Bugbereich her aus dem Mittschiffsbereich und damit aus dem Einzugsbereich des mittig angeordneten Propellers fernhält.

Seiten- und Mittelrumpf enden jeweils in einem dreieckigen bzw. leicht V-förmigen, dem MR-Boden angepaßten Spiegel. Letzterer taucht mit Rücksicht auf den wechselnden Tiefgang relativ tief ($T_{SM} = 1,0\text{ m}$, $T_{SS} = 0,9\text{ m}$), um auch bei leerem Schiff den Propeller vor Lufteinbruch zu schützen.

Der Lateralplan der Seitenrumpfe weist am Heck einen unter 45° verlaufenden Freischnitt auf, um die Steuerwirkung des Z-Antriebs sicherzustellen.

Das Modell wurde in der vorher beschriebenen Sektionsbauweise als Bausatz *B1* ($B_{SR} = 2,65\text{ m}$) in den nachfolgend wiedergegebenen Abmessungskombinationen gebaut (siehe auch Abschn. 5):

$$\begin{aligned}L_{OA} &= L1; L2; L3 \\ B &= B1 \\ h_{MR} &= h_{MR3}\end{aligned}$$

Um die geplante Variation der Mittelrumpf-Bodenhöhe entsprechend der Abstufung

$$h_{MR} = h_{MR1}; h_{MR2}; h_{MR3}$$

realisieren zu können, sind für die Varianten 2 und 3 zur Absenkung der MR-Heckgillung paßgenaue Endkeilstücke hergestellt worden. Diese werden nach der Vertikalverschiebung des Mittelrumpfes am Heck aufgesetzt, so daß die Höhenlage des MR-Spiegels und damit die vertikale Position des Propeller-Düsen-Systems unverändert bleibt. Geometrisch bedeutet dies, daß die Neigung der Gillung mit abnehmendem „Durchhang“ des Bodens stetig kleiner wird (siehe auch Anl. 4).

In den Anlagen 2 bis 4 sind die Linien der Formvariante 1 einschließlich der Einbauzeichnung für den Z-Antrieb (Anl. 4) wiedergegeben. **Hier, wie auch in allen anderen nachfolgenden Anlagen, ist der Mittelrumpf in der Höhenlage h_{MR2} ($h_{MR} = 1,0\text{ m}$) dargestellt.**

Anl. 3 zeigt das angewendete Prinzip der Sektionsbauweise. Die Anlagen 5 bis 7 geben die verwendeten Antriebselemente und das zugehörige Freifahrt diagramm für das Gesamtsystem Propeller-Düse + Z-Antrieb wieder.

Formvariante 1A

Die Variante besitzt gegenüber der Hauptform nur geringe Unterschiede und zeichnet sich dadurch aus, daß die Rücklage des MR-Buges um weitere 3 Bauspt.-Abstände auf $L = 6,0\text{ m}$ gegenüber dem SR-Bug vergrößert worden ist. Hierfür existiert keine Zeichnung.

Die Variante ist bei der Höhenlage h_{MR1} ($h_{MR} = 0,5\text{ m}$) getestet worden, um den Einfluß der Bug-Rücklage auf den Widerstand festzustellen.

Formvariante 2

Diese Variante resultiert aus dem Modell-Bausatz B2 mit vergrößerter Seitenrumpf-Breite ($B_{SR} = 3,68\text{ m}$). Hier ist gegenüber der Variante 1 außerdem der Mittelrumpf-Bug durch eine PONTON-Form ersetzt worden. Diese ist gekennzeichnet durch eine V-förmige, teilweise getauchte Bugplatte ($T_{BM} = 0,5\text{ m}$, $T_{BS} = -0,2\text{ m}$) und eine sog. Keilnase, was der Gillungslinie die vereinfachte Form einer durch Geradenstücke angenäherten hyperbolischen Tangens-Funktion verleiht. Die Hauptneigung der Gillungslinie verläuft bei der niedrigsten Höhenlage h_{MR1} ($h_{MR} = 0,5\text{ m}$) etwa unter einem Winkel von $\varphi_G = 8^\circ$ gegenüber der Basislinie. Diese Formgebung hatte sich bereits bei dem Vorgängertyp des Semikatamarans bewährt (*Grollius und Heuser, 1992*).

Um den Tiefgang der Bugfront beizubehalten, ist die bereits oben beschriebene Technik der „Endenaufdickung“ auch auf das Bugstück des Mittelrumpfes angewendet worden.

Das Prinzip dieser Methode ist noch einmal in vollständiger Form in Anl. 8 dargestellt. Anl. 9 (oben) gibt den Spantenriß der Formvariante 2 wieder.

Mit dem Modell sind die Höhenvarianten

$$h_{MR} = h_{MR1} ; h_{MR2} ; h_{MR3} ; h_{MR4}$$

d.h. einschließlich des Falls „echter“ Katamaran gefahren worden.

Formvariante 3

Die Variante entspricht der Formvariante 1 (Bausatz $B1$, $B_{SR} = 2,65 \text{ m}$) mit dem Unterschied, daß der MR-Bug die PONTON-Form entsprechend der Variante 2 aufweist.

Wie bei der letzteren sind mit diesem Modell alle 4 Höhenstufen

$$h_{MR} = h_{MR1} ; h_{MR2} ; h_{MR3} ; h_{MR4}$$

untersucht worden. Die Stufe h_{MR4} ist von der MR-Form unabhängig und kann deshalb auch als 4. Höhenstufe der Variante 1 betrachtet werden.

Der Spantenriß der Formvariante 3 ist in Anl. 9 (unten) dargestellt.

Formvariante 4

Mit der Variante 4 setzt die Modifikation des Seitenrumpfes ein.

Das Modell entspricht der Formvariante 3 (Bausatz $B1$, $B_{SR} = 2,65 \text{ m}$) mit der mittleren MR-Höhenlage h_{MR2} ($h_{MR} = 1,0 \text{ m}$). Die Bugsektion des Seitenrumpfes ist jedoch asymmetrisch mit nahezu ebener Innenwand ausgeführt. Der Spantenriß ist in Anl. 10 (oben) dargestellt.

Formvariante 5

Wie Formvariante 4 ist bei diesem Modell zusätzlich die Hinterschiffssektion des Seitenrumpfes asymmetrisch gestaltet worden, wobei hier jedoch die Außenwand eben gehalten ist (Anl. 10 (unten)).

Formvariante 5A

Vergleichbar mit Variante 5 sind hier die Hecksektionen der Seitenrumpfe seitenvertauscht montiert worden, so daß wie bei der Bugsektion die ebene Seitenwand nun innen liegt (Anl. 11 (oben)).

Formvariante 6

Diese Variante stellt die Endform dar (Anl. 11 (unten)). Sie unterscheidet sich von der vorherigen nur durch eine schlanker gehaltene Hecksektion des Seitenrumpfes, was bei einem Vergleich der Spantenrisse nur schwach zum Ausdruck kommt. Anl. 12 zeigt Bug- und Hecksektion des fertigen Modells, teilweise ausgerüstet für den Versuchseinsatz.

8.3 Ergebnisse der Hauptspant-Variation

Die Hauptspantvariation beinhaltet die Formvarianten 1 bis 3. In den zugehörigen Versuchen wurde jeweils die Höhenlage des MR-Bodens, gleichzeitig aber auch die SR-Breite (Varianten 2 und 3) und die MR-Bugform (Varianten 1 und 2) untersucht.

Ziel der Betrachtung war in jedem Fall, die Variante mit den besten Fahreigenschaften zu finden, wobei die Maxime darin bestand, den angestrebten Geschwindigkeitsbereich von $F_{nh} = 0,7$ bis $F_{nh} = 0,8$ zu erreichen. Gleichzeitig war es aber auch wünschenswert, dabei eine möglichst große Tragfähigkeit zu erzielen, d.h. die spezifische Leistung auf einem vergleichbar „gemäßigten“ Level zu halten.

Die Gegensätzlichkeit, die in diesen beiden Forderungen zum Ausdruck kommt, läßt erkennen, daß das angestrebte Ergebnis auf einen Kompromiß hinauslaufen würde.

Unter diesem Aspekt wurde die SR-Breite nur in mäßigen Grenzen verändert, denn nach den Gesetzmäßigkeiten der Verdrängungsströmung mußte davon ausgegangen werden, daß ein Seitenrumpf mit vergrößertem Volumenkoeffizienten zu einer Schiffsform führen würde, die sich im negativen Sinne progressiv von dem angestrebten Geschwindigkeitsziel entfernt.

Hinsichtlich der modifizierten MR-Bugform ist zu bemerken, daß bereits nach den ersten Versuchsreihen feststand, daß mit dem EURO-II-Leichterbug aufgrund der starken Staubbildung keine Spitzengeschwindigkeiten zu erzielen sind, so daß dem PONTON-Bug nach dem Vorbild des Semikatamaran-Prototyps der Vorzug gegeben wurde.

Die Ergebnisse der Propulsions- und Widerstandsversuche für die 3 Formvarianten sind in den Anlagen 13 bis 17 (Variante 1), 18 bis 22 (Variante 2) und 23 bis 27 (Variante 3) wiedergegeben.

Nachfolgend werden die wichtigsten Einflüsse der Modifikationen, bezogen auf die erfaßten Meß- und Umrechnungsgrößen, dargestellt.

Generell ist dabei festzustellen, daß zwischen Semikatamaran und dem echten Katamaran hinsichtlich der Antriebseigenschaften klare Unterschiede bestehen, die darauf beruhen, daß bei letzterem die Abdeckung des Innenraums durch den Mittelrumpf fehlt. Die Abweichungen kommen besonders in der Charakteristik der Gütegrade zum Ausdruck.

Zu Anlagen 13, 18, 23

Trimm

Der Trimm verändert sich gleichmäßig mit der Anhebung des MR-Bodens, der Trend der Änderung ist jedoch von der verwendeten MR-Bugform abhängig. Während er bei der Keilspantform in Richtung kopflastig-hecklastig verläuft (Anl. 13), bewegt er sich bei der Pontonform in umgekehrte Richtung (Anlagen 18, 23). Ursache ist offensichtlich die Reduzierung der örtlichen Unterdruckbildung bei dem stark auflaufenden PONTON-Bug.

Absenkung

Die Absenkung verläuft umgekehrt proportional mit der Bodenanhebung aufgrund der abnehmenden Verdrängungswirkung.

Leistung, Drehzahl

Drehzahl und Leistung nehmen tendenzmäßig mit der Bodenanhebung ab, allerdings verläuft die Änderung in unregelmäßigen Stufen.

Zu Anlagen 14, 19, 24

Gesamtgütegrad

Der Gesamtgütegrad bewegt sich bei allen 3 Varianten bis zu einem Maximalwert von $\eta_D = 0,4$ und entspricht damit einer Größenordnung, die bezogen auf den untersuchten Wert von $h/T = 1,43$ als gut, jedoch nicht als herausragend zu bezeichnen ist.

Der Trend geht bei verringerter MR-Eintauchung zu kleineren Werten. Auffällig ist jedoch ein geschwindigkeitsabhängiger Trendwechsel, der in der Reihenfolge der untersuchten Varianten bei der ersten noch gar nicht, bei der zweiten und der dritten verstärkt in Erscheinung tritt. Diese Erscheinung ist verbunden mit einer Verlagerung

der Wirkungsgradspitzenwerte in den oberen Geschwindigkeitsbereich, was als durchaus positiv zu bewerten ist.

Der Reihenfolge der geometrischen Änderungen entsprechend ist der Effekt der veränderten Form (PONTON-Bug) und besonders der vergrößerten Breite des MR-Bugs zuzuschreiben.

Gütegrad der Anordnung

Beim Semikatamaran wird der Gütegrad durch die Form des MR-Bugs bestimmt. Bei den Varianten 2 und 3 mit PONTON-Bug verhalten sich die Werte relativ stabil und bewegen sich um $R = 1,0$ (Anl. 19, 24), während sie bei der Variante 1 mit EURO-II-Leichterbug bei wachsender MR-Höhenlage eine umgekehrte Tendenz aufweisen und ausgehend von $R = 1,0$ bis auf $R = 0,8$ absinken (Anl. 14).

Beim Katamaran zeigt sich der Einfluß der SR-Breite. Bei der Variante B2 ($B_{SR} = 3,68 \text{ m}$) bewegen sich die Werte mit wachsender Geschwindigkeit zwischen $R = 0,8$ bis $R = 1,2$ (Anl. 19) aufsteigend, bei der Variante B1 ($B_{SR} = 2,65 \text{ m}$) in ähnlichen Grenzen absteigend (Anlagen 14, 24).

Werte von $R = 1,0$ sind als günstig zu bezeichnen und hier primär auf die exponierte Anordnung des Propellerantriebs zurückzuführen, die eine wenig gestörte Anströmung sicherstellt. Tendenzmäßig weisen die Varianten mit PONTON-Bug Vorteile gegenüber der EURO-II-Leichterform auf.

Nachstromziffer, Propellerwirkungsgrad

Bei allen Formvarianten bewegen sich die Nachstromziffern mit wachsender MR-Höhenlage zu kleineren Werten, um dann beim Austauschen des Rumpfes - besonders bei den Varianten 1 und 3 mit größerer MR-Breite - wieder anzuwachsen. Von diesen Größen abhängig (Freifahrtdiagramm) verhalten sich die Propellerwirkungsgrade entsprechend umgekehrt. Auffällig ist, daß sich die Werte über einen weiten Bereich mit der Geschwindigkeit nur wenig verändern. Dies trifft jedoch nicht für den Fall des „echten“ Katamarans zu. Hierin zeigt sich die Nichtähnlichkeit zwischen den beiden Schwimm- bzw. Strömungszuständen besonders deutlich.

Größenordnungsmäßig bewegen sich die Nachstromziffern mit wachsender MR-Höhe von $w = 0,2$ bzw. $0,3$ (h_{MR1}) bis $w = 0$ (h_{MR3}), wobei sich diese Grenze mit $w = -0,2$ auch auf negative Werte ausdehnen kann (s.a. Formvariante 1, 2; Anlagen 14, 19).

Das oben beschriebene Absinken der Nachstromwerte erklärt sich daraus, daß mit der Abnahme des Bodendurchhangs eine Verringerung der geodätischen Druckhöhe längs einer Bodenstromlinie verbunden ist, so daß in der heckseitigen Grenzschicht

mehr Geschwindigkeitsenergie zur Verfügung steht, was gleichbedeutend mit einer Verstärkung der Propellerzuströmung ist.

Das Auftreten negativer Nachstromziffern sagt aus, daß die Geschwindigkeit der Zuströmung die Fahrgeschwindigkeit übersteigt. Dies erklärt sich nach der Theorie der Potentialströmung aus der Spiegelungswirkung der Doppelrumpfanordnung, die aus der Symmetriebedingung auf der Mittellängsebene resultiert. Der Spiegelungseffekt kann in der zähen Strömung in Verbindung mit der oben beschriebenen Energiezunahme zu überhöhten Strömungsgeschwindigkeiten im „Innenraum“ des Katamarans führen.

Sogziffer, Schiffseinflußgrad

Mit der Anhebung des MR-Bodens nimmt die Sogziffer ab. Dies geht konform mit dem Trend der Nachstromziffer, denn mit verstärkter Propelleranströmung muß zwangsläufig auch die Sogwirkung abnehmen. Auch das Auftreten negativer Sogziffern, die in Verbindung mit den negativen Nachstromziffern auftreten (Anlagen 14, 19), stellt keinen Widerspruch dar, sondern drückt nur aus, daß aufgrund der überhöhten Rückstromgeschwindigkeiten innerhalb des MR-Kanals ein Zusatzimpuls in Fahrtrichtung entsteht, der den Propeller entlastet (Prinzip des Strahlantriebs). Tatsächlich stellt also der Propellerschub nur einen Teil des Gesamtschubes dar, womit sich der scheinbare Widerspruch, daß der Schub kleiner ist als der Widerstand, auflöst.

Da die Sogziffer weniger stark sinkt als die Nachstromziffer kehrt sich beim Schiffseinflußgrad die Trendrichtung um, d. h., mit zunehmender MR-Bodenhöhe nehmen die Werte ab. Größenordnungsmäßig bewegt sich der Schiffseinflußgrad in einer Bandbreite von $0,8 \text{ (} 0,6 \text{)} < H < 1,2$ und übersteigt damit die Werte normaler Einrumpfschiffe.

Das gegensätzliche Verhalten von Propellerwirkungsgrad und Schiffseinflußgrad bestimmt in erster Linie die Eigenschaften des Gesamtgütegrads, der sich gegenüber einer Veränderung der MR-Bodenhöhenlage relativ unempfindlich zeigt.

Interessant ist die Feststellung, daß der weiter oben beschriebene formabhängige Trend des Gesamtgütegrads offensichtlich primär aus dem Verlauf der Sogziffer als Funktion der Geschwindigkeit resultiert, der bei den 3 Formvarianten besonders markante Unterschiede zeigt.

Zu Anlagen 15, 20, 25

Spezifische Leistung

Im Gegensatz zur absoluten Darstellung der Wellenleistung zeigt die Auftragung der spezifischen Werte besondere Regelmäßigkeiten, in die sich auch der Grenzfall des

„echten“ Katamarans, der sich vom Semikatamaran aus hydrodynamischer Sicht stark unterscheidet, zwanglos einfügt. Die Diagramme weisen in ihrer Gesamtcharakteristik eine Gesetzmäßigkeit auf, die für die weiteren Betrachtungen eine maßgebliche Bedeutung hat.

Betrachtet man die Kurven in der Folge der wachsenden Höhenlage des MR-Bodens (h_{MR1} bis h_{MR4}), so ist zu erkennen, daß bspw. die Kurve h_{MR1} im unteren Bereich unterhalb der Kurve h_{MR2} , im oberen Bereich jedoch oberhalb dieser Kurve verläuft, so daß sich beide in einem Punkt schneiden. Dasselbe gilt zyklisch für die Kurvenpaare h_{MR2} , h_{MR3} und h_{MR3} , h_{MR4} . Es ergeben sich 3 Schnittpunkte, die hinsichtlich der Geschwindigkeit aufsteigend angeordnet sind².

Diese Punkte kennzeichnen offensichtlich die Grenzen der wirtschaftlichen Geschwindigkeit für die jeweils niedrigere Höhenvariante der oben herausgestellten Wertepaare. In einem gedanklichen Grenzübergang ergibt die Verbindungskurve der herausgestellten Schnittpunkte einen funktionalen Zusammenhang zwischen der geometrischen Höhenlage des MR-Bodens und der wirtschaftlichen (Höchst-) Geschwindigkeit des zugehörigen Schiffsentwurfs³.

Nimmt man an, daß zwischen der wirtschaftlichen und der physikalischen Höchstgeschwindigkeit ein (annähernd) linearer Zusammenhang besteht, was aufgrund der Charakteristik der betrachteten Diagramme durchaus als zulässig erscheint, so stellt der oben beschriebene Zusammenhang ein gutes Kriterium dar, um aus den zahlreichen Varianten die Schiffsform zu bestimmen, die der vorgegebenen Zielsetzung am ehesten entspricht (relative Betrachtungsweise).

8.4 Festlegung der Hauptspant-Abmessungen

In Anl. 28 sind die Funktionen der wirtschaftlichen Höchstgeschwindigkeit für die 3 untersuchten Formvarianten einschließlich der zugehörigen spezifischen Leistung über der MR-Höhe aufgetragen worden. Der Nullpunkt kennzeichnet das klassische Einrumpfschiff, während die eingetragene Gerade $h_{MR} = 2,8 \text{ m}$ das Austauschen des Mittelrumpfes markiert und damit die geometrische Grenze zum „echten“ Katamaran darstellt.

Typisch für alle drei Geschwindigkeitskurven ist ihr degressiv aufsteigender Verlauf, der eine asymptotische Annäherung an einen oberen Grenzwert beschreibt. Dieser kennzeichnet die wirtschaftliche Höchstgeschwindigkeit des Katamarans. Eine Extrapolation der Kurven in Richtung des Nullpunktes führt demgegenüber zur wirtschaftlichen Geschwindigkeit des klassischen Einrumpfschiffes. Zwischen diese beiden Extremfälle reiht sich der Semikatamaran zwanglos ein.

² Diese Gesetzmäßigkeit zeigt sich in den Darstellungen des zugehörigen Widerstandsversuches (Anlagen 17, 22 und 27) nicht bzw. nur andeutungsweise.

³ Auf eine mathematisch prinzipiell mögliche infinitesimale Darstellung der Funktion $V_W = f(h_{MR} (D(V)))$ wurde hier wegen der angewendeten relativen Betrachtungsweise verzichtet.

Die eingetragenen Kurven der spezifischen Leistung verdeutlichen, daß Geschwindigkeitssteigerungen prinzipiell immer mit einer Zunahme der Antriebsleistung verbunden sind. Unter diesem Aspekt stellen die eingetragenen Geschwindigkeitskurven im Sinne der Definition nur ein Kriterium zur Minimierung dar.

Im erweiterten Sinne sagt das Diagramm aus, daß es auf flachem Wasser und bei unterkritischer Fahrweise keine Schiffsform gibt, die wirtschaftlicher als das Einrumpfschiff und schneller als der Katamaran wäre.

Der Semikatamaran stellt einen Kompromiß aus beiden Extremfällen dar: Er trägt mehr als der Katamaran und fährt dabei aber schneller als das Einrumpfschiff.

Auf der Basis einer Kompromißlösung war von den 3 untersuchten Varianten die Form zu favorisieren, die bei großer Tragfähigkeit die höchste Geschwindigkeit aufweist.

Die Wahl fiel auf die Variante 3 aus der Modellserie B1 ($B_{SR} = 2,68 \text{ m}$; $B_{MR} = 5,36 \text{ m}$) mit MR-PONTON-Bug und der MR-Bodenhöhe h_{MR2} ($h_{MR} = 1,0 \text{ m}$).

Dieses Schiff fährt unter wirtschaftlichen Bedingungen mit $V_w = 15,56 \text{ km/h}$ knapp 1 km/h schneller als seine Konkurrenten, wobei der Geschwindigkeitsabfall gegenüber dem Spitzenwert des Katamarans aber nur einen vertretbaren Bruchteil des maximal möglichen Geschwindigkeitsgewinns ausmacht.

8.5 Ergebnisse der Seitenrumpf-Variation

Zur Kontrolle der Strömungsbildung wurden bei den Versuchen bei bestimmten Meßfahrten mit festgelegten Geschwindigkeiten (im vorliegenden Fall $V = 14 \text{ km/h}$) Unterwasser- und Seitenfotos hergestellt, um so auch verschiedene Formmodifikationen miteinander vergleichen zu können.

In den Anlagen 29 und 30 ist ein Fotosatz dargestellt, der eine Testfahrt mit der favorisierten Formvariante 3 in der Konfiguration der mittleren MR-Bodenhöhe h_{MR2} wiedergibt.

Aus den Unterwasserfotos (Anl. 30) entnimmt man, daß die Strömung längs des MR-Bodens einen günstigen, fast parallelen Verlauf hat. Bei den Seitenrümpfen zeigt sich dagegen eine Strömung, die den Boden im Bugbereich schräg von innen nach außen, im Heckbereich von außen nach innen überquert. Die Art der Überströmung des Kimmbereichs stellt eine „Kantenumströmung“ dar, bei der man davon ausgehen kann, daß auf der Leeseite der Strömung, d.h. beim Vorschiff auf der Außenseite, beim Hinterschiff auf der Innenseite, Ablösung auftritt.

Es galt, diesen ungünstigen, energieverzehrenden Effekt zu beseitigen, wobei vorstellungsmäßig davon ausgegangen wurde, daß eine über dem Seitenrumpf parallel zur Mittellängsebene verlaufende Strömung den Idealzustand darstellen würde.

Als Gegenmaßnahme erschien grundsätzlich eine asymmetrische Bauweise der Seitenrumpfe geeignet zu sein. Probeweise wurde zunächst die Bugsektion des Seitenrumpfes durch eine asymmetrische, inne gerade gehaltene Form ersetzt (Formvariante 4).

Die Ergebnisse der Messungen, die in den Anlagen 31 bis 33 denen der Ausgangsform gegenübergestellt sind, bestätigen grundsätzlich die vorher getroffenen Annahmen. Ebenfalls zeigen die Unterwasseraufnahmen (Anl. 34), daß der Verlauf der Strömung im Vorschiff positiv korrigiert werden konnte. Allerdings hat sich im Hinterschiff die Situation verschlechtert; der Schrägverlauf der Strömung hat sich gegenüber dem Ausgangsfall verstärkt. Dementsprechend fällt die erwartete Leistungsreduzierung relativ gering aus (ΔD - 8 % ; P_D - 10 % bei $V = 16,0 \text{ km/h}$; Anl. 33).

Der Erfolg gab Anlaß dazu, die Formkorrektur auch auf die Hecksektion des Seitenrumpfes anzuwenden. Es entstand zunächst die Formvariante 5 mit außen liegender, gerader Seitenfläche, die jedoch das Propulsionsverhalten ins Gegenteil verkehrte und erhebliche Verschlechterungen erbrachte (Anl. 40). Daraufhin wurden die beiden Hecksektionen vertauscht montiert, so daß die gerade Seitenfläche wie bei der Bugsektion auf der Innenseite zu liegen kam (Formvariante 5A). Erst diese Maßnahme führte zu einer nennenswerten Verbesserung gegenüber der Formvariante 4 (ΔD - 23 % ; P_D - 23 % bei $V = 16,0 \text{ km/h}$; Anl. 37). Die Strömung im Bereich des SR-Hecks verlief nun auch in der gewünschten Form (Anl. 42). Allerdings zeigte sich im Versuch eine ausgeprägte Heckwellenfront dicht vor dem Spiegel, die in der Seitenaufnahme (Anl. 41) nur schwach erkennbar ist, in der Unterwasseraufnahme jedoch deutlich durch Schaum- und Schlierenbildung zum Ausdruck kommt (Anl. 42, unten). Dies kennzeichnet das Auftreten starker Turbulenzen in der Strömung. Als Gegenmaßnahme wurde das SR-Heck im Bereich der hinteren Schulter verschlankt, was bezogen auf die Formvariante 5A zu einer weiteren, erheblichen Leistungsabsenkung führte (ΔD - 35 % ; P_D - 37 % bei $V = 16,0 \text{ km/h}$; Anl. 37). Die Auswirkungen dieser Maßnahme kommen auch im Strömungsbild zum Ausdruck, das nun einen fast idealen Verlauf aufweist (Anlagen 43, 44).

Faßt man die Einflüsse aller SR-Änderungen zusammen, so konnte gegenüber der Ausgangsvariante 4 bezogen auf den Testfall $V = 16 \text{ km/h}$ eine Reduzierung der spezifischen Leistung um ΔD - 54 % bzw. der absoluten Leistung um P_D - 57 % erzielt werden.

Interessant ist, wie sich die Auswirkungen der Formänderungen in der Propulsionsanalyse (Anlagen 35, 36) widerspiegeln. Generell zeigen die direkten Meßgrößen in der entsprechenden Reihenfolge eine abnehmende Tendenz, wobei insbesondere der Rückgang des hecklastigen Trimmings bemerkenswert ist. Bei den Gütegraden erzeugt vor allem die letzte Formvariation eine Veränderung in der Kurven-

charakteristik, die bei Schiffsgütegrad und Gütegrad der Anordnung am stärksten hervortritt und im oberen Geschwindigkeitsbereich zu einer deutlichen Verbesserung des Gesamtgütegrades mit einem Spitzenwert von $\sigma = 0,55$ führt. Auffallend klein bzw. fast unbedeutend sind dagegen die Veränderungen in der Darstellung des Widerstandes (Anlagen 38, 39).

8.6 Ergänzungen

In den Anlagen 45, 46 sind Widerstandsversuche der Formvarianten 1 und 1A dargestellt, die in der Konstellation der MR-Höhenlage h_{MR1} durchgeführt wurden, um den Einfluß einer vergrößerten MR-Rücklage zu untersuchen.

Obwohl die geringe Signifikanz des Widerstandsversuches im Vergleich zu den Propulsionsergebnissen in Abschn. 8.5 herausgestellt wurde, soll versucht werden, aus den Ergebnissen eine Schlußfolgerung abzuleiten.

Während die Darstellung der Schleppleistung keine markanten Unterschiede zeigt, ist bei Absenkung und (kopflastigem) Trimm ein deutlicher Trend zu kleineren Werten zu beobachten. Der Rückgang des Trimms ist besonders interessant und erklärt sich aus der rückwärtigen Verlagerung des dominierenden Unterdruckgebietes unterhalb des MR-Buges (verringerte Hebelwirkung).

Unter dem Gesichtspunkt erhöhter Tragfähigkeit wäre eine Vorverlagerung des MR-Buges durchaus anzustreben. Damit würde sich der Trend umkehren und zu einer Verstärkung des kopflastigen Trimms führen. Dieses entspricht unter Propulsionsbedingungen aber einer weiteren Abschwächung des hecklastigen Trimms und könnte im Sinne von Abschn. 8.5 dann eine positive Maßnahme darstellen. Eine endgültige Klärung ist an dieser Stelle nicht möglich, so daß hierzu weiterer Untersuchungsbedarf besteht.

8.7 Serienversuche

In den Anlagen 47 bis 79 sind die Ergebnisse der Serienversuche mit der Formvariante 6 des „**Kanalschiffs**“ für den Fall „unbegrenzte Fahrwasserbreite“ dargestellt. Die Anlagen 80 bis 90 enthalten die Versuche, die im Standard-Rechteckkanal gefahren wurden. Um den Einfluß der Fahrwasserbegrenzung auf das Propulsionsverhalten zu demonstrieren, sind mit der mittleren Längenvariante $L1$ ($L_{OA} = 85,0 \text{ m}$) bei erweiterter Tiefgangsvariation zusätzlich Widerstandsversuche durchgeführt worden, so daß bei diesen Fällen eine vollständige Propulsionsanalyse möglich war.

Die nachfolgenden Tabellen geben eine Übersicht über die Systematik der Serienversuche:

Unbegrenzte Fahrwasserbreite

		Bez.		L3		L1		L2	
		L _{OA} [m]		60,0		85,0		110,0	
Bez.	h[m]	Bez.	T[m]	Anlagen-Nr./ Versuchsart (P = Propulsion, W = Widerstand)					
h1	4,0	T1	2,8	47 - 49	P	56 - 60	P, W	71 - 73	P
		T2	2,4	--		56 - 60	P, W	--	
		T3	2,0	47 - 49	P	56 - 60	P, W	71 - 73	P
h2	7,5	T1	2,8	50 - 52	P	61 - 65	P, W	74 - 76	P
		T2	2,4	--		61 - 65	P, W	--	
		T3	2,0	50 - 52	P	61 - 65	P, W	74 - 76	P
h3	10,0	T1	2,8	53 - 55	P	66 - 70	P, W	77 - 79	P
		T2	2,4	--		66 - 70	P, W	--	
		T3	2,0	53 - 55	P	66 - 70	P, W	77 - 79	P

Standard-Rechteck-Kanal

		Bez.		L3		L1		L2	
		L _{OA} [m]		60,0		85,0		110,0	
Bez.	h[m]	Bez.	T[m]	Anlagen-Nr./ Versuchsart (P = Propulsion, W = Widerstand)					
h1	4,0	T1	2,8	80 - 82	P	83 - 87	P, W	88 - 90	P
		T2	2,4	--		83 - 87	P, W	--	
		T3	2,0	80 - 82	P	83 - 87	P, W	88 - 90	P

Bemerkenswert an den Versuchsergebnissen ist die sehr geringe Neigung des untersuchten Fahrzeugtyps zu größeren Trimmbewegungen. Insbesondere treten bei achterlichen Trimmlagen nur relativ kleine Winkelauslenkungen auf, wodurch das Schiff auch auf sehr flachem Wasser höhere Geschwindigkeiten fahren kann, ohne daß eine verstärkte Gefahr der Grundberührung besteht.

Hinsichtlich der erreichten Wirkungsgrade ist durch die Seitenrumpfoptimierung eine deutliche Verbesserung erzielt worden. Für den Konstruktionstiefgang $T = 2,8 \text{ m}$ werden maximal je nach Wassertiefe bei unbegrenzter Fahrwasserbreite Gesamtwirkungsgrade zwischen $\eta_D = 0,55$ und $\eta_D = 0,65$ erzielt, was für ein Binnenschiff als sehr gut zu bezeichnen ist (Anlagen 57, 62 und 67). Selbst im Kanal werden trotz hoher Propellerbelastungen noch Werte um $\eta_D = 0,45$ erreicht (Anl. 84).

Die Ursache ist in erster Linie in der ungewöhnlichen Charakteristik der Sogziffer zu suchen, die in Richtung wachsender Geschwindigkeiten eine fallende Tendenz aufweist, wobei in einem großen Teil der betrachteten Fälle sogar negative Werte erreicht werden. Dieses kennzeichnet per Definition eine zusätzliche Schubwirkung aus der Strömung, worauf bereits in Abschn. 8.3 hingewiesen wurde. Hierfür sind in Abhängigkeit von der Charakteristik der Nachstromziffer unterschiedliche Effekte verantwortlich.

Nimmt diese in dem betrachteten Geschwindigkeitsbereich ebenfalls negative Werte an, so handelt es sich offensichtlich um die Wirkung eines Zusatzimpulses aus der überhöhten „Innenströmung“ (Prinzip des Strahlantriebs, s.a. Abschn. 8.3). Dieser Effekt tritt bspw. hier unter den Strömungsbedingungen des Kanals auf (Anl. 84).

Bewegt sich die Nachstromziffer jedoch im üblichen positiven Bereich wie im Fallbeispiel des seitlich unbegrenzten Fahrwassers (Anlagen 57, 62 und 67), liefert die Propulsionsanalyse für die zusätzliche Schubkraft keine direkte Erklärung mehr.

Hypothetisch ist es jedoch denkbar, daß - unterstützt durch die asymmetrische Form der Seitenrumpfe - eine Zirkulationsströmung um die Rumpfe erzeugt wird⁴, die die Außenströmung verstärkt und die Innenströmung abschwächt (von oben gesehen: Drehung über Bug nach außen), so daß, wie auch tatsächlich festzustellen ist, der Nachstrom positive Werte annimmt. Eine induzierte Kraftwirkung aus dieser Strömung würde dann die oben genannte Schubunterstützung erklären.

9. Entwurf + Formvariation „Rheinschiff“

9.1 Systematik

Im Rahmen des verkürzten Teilprogramms für das "Rheinschiff" (siehe Abschn. 5) wurde der Basisentwurf in wesentlichen Teilen dem optimierten „Kanalschiff“ (Formvariante 6) nachgebildet. Dies betraf sowohl die Formgebung des Hauptspants, bei dem die Verhältnismerte B_{SR}/B und B_{MR}/B und die MR-Bodenhöhe h_{MR} übernommen wurden, als auch die Formgebung des Vorschiffs.

Das SR-Heck erhielt dagegen eine konventionelle, symmetrische Form, die für die Unterbringung des getunnelten Propeller-Düsenantriebs besser geeignet war (s.a. Abschn. 5, Vorplanung „Rheinschiff“).

Bei dieser Formgebung war grundsätzlich eine nachteilige Hinterschiffsumströmung zu erwarten, wie sie bereits aus den Versuchen mit dem Kanalschiff bekannt war (s.a. Kanalschiff, Formvariante 1, Anl. 30 unten). Es konnte jedoch davon ausgegangen werden, daß die nach innen gerichtete Schrägströmung im Bodenbereich durch die entgegengesetzte Drallwirkung des über oben nach innen drehenden Propellers kompensiert wird. Diese Vorstellung hat sich nachträglich im wesentlichen auch als richtig erwiesen.

Für die Optimierungsaufgabe wurde als Schiffslänge die Variante $L1$ ($L_{OA} = 110,0 \text{ m}$) ausgewählt. Weiterhin wurden Tiefgang und Wassertiefe wie beim „Kanalschiff“ auf die Varianten $T1$ ($T = 2,8 \text{ m}$) und $h1$ ($h = 4,0 \text{ m}$) festgelegt.

Während der ersten Versuche zeigte sich am Heck ein sehr schlechter Strömungsverlauf, der auf Ablösungseffekte schließen ließ.

⁴ In potentialtheoretischen Rechenmodellen wird bei der Darstellung von Doppelrumpfschiffen eine Zirkulation eingeführt, um die Symmetriebedingung auf der Mittellängsebene im Bereich der „Innenströmung“ zu erfüllen (siehe auch (Jensen, 1989)).

Die Verbesserungsbemühungen betrafen zunächst die Formgebung der MR-Heckgillung und des SR-Hecks. Weiterhin wurde versucht, durch Vorverlegung des MR-Hecks, ähnlich wie bei dem Prototyp des Semikatamarans (*Grollius und Heuser, 1992*), das Strömungsbild zu ändern - beides mit negativem Ergebnis.

Nachdem auch die Anbringung eines dritten Propellers am Heck des Mittelrumpfes den Strömungsverlauf nicht verbesserte, wurde entschieden, das SR-Heck nach dem Vorbild des Kanalschiffs asymmetrisch auszuführen. Dies wurde in einfacher Weise durch eine Verlängerung des Schiffes erreicht. Das Maß der Verlängerung ergab sich aus der Vorgabe, daß das ergänzte Heckteil des Seitenrumpfes bei asymmetrischer Linienführung in einem scharfen Steven enden sollte. Die Bedingung, die Anordnung des Antriebs nicht zu verändern, führte dazu, daß der symmetrisch zur SR-Mitte angeordnete Propellertunnel in unorthodoxer Weise an der Seite des Rumpfes vor dem Heck herausgeführt wird.

Nachdem diese Lösung schließlich deutliche Verbesserungen lieferte, wurden noch einige Detailänderungen an SR-Heck durchgeführt (u.a. Verschlinkung des Hecks, Korrektur des Tunnels mit achsparalleler Verlegung des Propellerantriebs zur Innenseite hin), die jedoch alle keine nennenswerten Veränderungen mehr bewirkten.

Anl. 91 zeigt in einer tabellarischen Kurzübersicht die insgesamt 9 untersuchten Formvarianten einschließlich der zugehörigen Hauptdaten. Eine weitere Tabelle beinhaltet die tiefgangsabhängigen Daten der Variante 8, mit der die geplanten Serienversuche entsprechend Abschn. 3 durchgeführt wurden.

Der Sonderfall 5A stellt eine Modifikation der Variante 5 mit vergrößerter MR-Bodenlage h_{MR3} ($h_{MR} = 1,5 \text{ m}$) dar. Auf die Ergebnisse wird in Abschn. 9.5 näher eingegangen.

9.2 Beschreibung der Formvarianten

Basisentwurf - Formvariante 1

Die Konstruktion des Vorschiffs ist, wie bereits angedeutet, von der Formvariante 6 des Kanalschiffs übernommen (MR-Bugform = PONTON, SR-Bug asymmetrisch, ebene Innenfläche) und maßstäblich umgesetzt worden. Beim MR-Bug wurde das Verhältnis von Rücklage zu Breite näherungsweise beibehalten ($L = 5,7 \text{ m}$ bei $B_{MR} = 11,4 \text{ m}$).

Das SR-Heck ist als getauchter, seitlich abgerundeter Spiegel ausgeführt. Die Propellerwellen werden frei aus dem Rumpf herausgeführt und sind an den Enden in Wellenböcken gelagert. Auf ein Totholz und auf Tunnelschürzen ist verzichtet worden, so daß der Tunnel eine muldenartige Form mit gerundetem Übergang in die Kimm aufweist.

Der MR-Boden ist dachförmig ausgebildet (negative Aufkimmung), um die eingetragene Luft außerhalb des Propellerbereiches zu halten und durch die Mitte abzuleiten. Der Winkel der Aufkimmung ist gegenüber dem „Kanalschiff“ mit $\beta = -3^\circ$ im Betrag halbiert, so daß die Stichmaße der Bodenanhebung (Höhendifferenz zwischen MR-Mitte und -Seite) bei beiden Fahrzeugen trotz Verdopplung der MR-Breite identisch sind. Ebenfalls gleich gehalten ist die Eintauchung der dachförmigen Bugplatte des MR-Buges, wobei die Stichmaße Mitte/Seite MR ausgetauscht worden sind ($T_{BM} = -0,5 \text{ m}$, $T_{BS} = 0,2 \text{ m}$). Das Heck des Mittelrumpfes besitzt einen S-förmigen Gillungsverlauf. Der MR-Spiegel endet etwa in Höhe der Wasseroberfläche ($T_{SM} = -0,1 \text{ m}$, $T_{SS} = 0,0 \text{ m}$) und liegt bündig mit dem Seitenrumpfheck.

Das Modell wurde in Sektionsbauweise analog dem Bausatz *B1* des Kanalschiffes ($B_{SR}/B = 0,25$ und $B_{MR}/B = 0,5$), mit der korrespondierenden Breite *B1* ($B = 22,8 \text{ m}$) und der MR-Höhenlage h_{MR2} ($h_{MR} = 1,0 \text{ m}$) in den nachfolgenden Abmessungenkombinationen gebaut (siehe auch Abschn. 5):

$$\begin{aligned} L_{OA} &= L1; (L2); (L3)^5 \\ B &= B1 \\ h_{MR} &= h_{MR2} \end{aligned}$$

In den Anlagen 92 bis 94 sind die Linien der Basisvariante einschließlich der Antriebs- und Ruderkonfiguration wiedergegeben. Anl. 93 zeigt die vorgefertigten Sektionen in der entsprechenden Konfiguration. Die Anlagen 95 bis 97 beinhalten die Antriebselemente und das Ruder der verwendeten Doppelanlage. In Anl. 98 sind die Ergebnisse des Freifahrtversuches mit dem System Propeller + Düse dargestellt.

Formvariante 2

Bei der Formvariante 2 (Anl. 99) ist der innen liegende Bereich des ursprünglich symmetrischen SR-Hecks aufgefüllt worden, so daß die Innenwand wie im Vorschiff die Form einer ebenen Fläche annimmt.

Formvariante 3

Die Form des SR-Hecks entspricht wieder der von Formvariante 1. Der Mittelrumpf ist jedoch um eine Länge entsprechend $L = 8,0 \text{ m}$ verkürzt worden, so daß sein Heck nach dem Vorbild des Semikatamaran-Prototyps vorgezogen erscheint (Anl. 100).

⁵ Die Varianten L2 und L3 kamen in den Versuchen wegen des unerwartet hohen Aufwandes, den die Formoptimierung erforderte, nicht mehr zum Einsatz.

Formvariante 4

Die Form entspricht der Variante 3, wobei jedoch die ursprünglich S-förmige Gillungslinie des Mittelrumpfes durch eine Gerade ersetzt worden ist (Anl. 101).

Formvariante 5, 5A

Die Formvariante 5 basiert auf der Variante 2 mit ebener Innenwand des SR-Hecks. Der Unterschied besteht in der als Gerade ausgeführten Gillungslinie des MR-Hecks (Anl. 102).

Die Variante 5A (Anl. 103) kennzeichnet die Änderung der MR-Höhenlage von h_{MR2} ($h_{MR} = 1,0\text{ m}$) auf h_{MR3} ($h_{MR} = 1,5\text{ m}$).

Formvariante 6

Die Schiffsform entspricht exakt der Formvariante 2. Der Unterschied entsteht aus der Installation eines dritten Antriebs, der aus einem Z-Antrieb mit Propeller + Düse besteht und mittig am Heck des Mittelrumpfes angeordnet ist (Anl. 104).

Die zusätzliche Antriebseinheit wurde bereits bei der Untersuchung des „Kanalschiffs“ eingesetzt (Anlagen 5 bis 7).

Formvariante 7

Die Variante stellt eine Modifikation der Formvariante 2 dar, bei der die Schiffslänge um $L = 8,0\text{ m}$ auf $L_{OA} = 118,0\text{ m}$ verlängert worden ist (Anl. 105). Die Hecksektion des Seitenrumpfes besitzt hier die angestrebte asymmetrische Form mit ebener Innenwand und endet in einem scharf ausgeführten Steven. Der Boden des Mittelrumpfes verläuft in dem ergänzten Heck-Teilstück horizontal. Der Seitenrumpf läuft seitlich in den Spiegel des Mittelrumpfes ein.

Formvariante 8

Hierbei ist der Seitenrumpf der Formvariante 7 im Bereich der hinteren Schulter verschlankt worden. Um die bestehende Tunnelform erhalten zu können, ist die Außenkante als überkragende Schürze ausgebildet worden (Anl. 106).

Formvariante 9

Die Variante⁶ beinhaltet eine Neukonstruktion der Tunnelausführung mit dem Ziel, durch Abrundung der äußeren Tunnelkante die Strömung im Bereich der hinteren Schulter zu verbessern (Anl. 107). Im Rahmen der Änderung ist die gesamte Antriebseinheit um ein korrespondierendes Maß von $s = 0,24 \text{ m}$ parallel zur Mittellängsachse nach innen versetzt worden.

9.3 Das Strömungsproblem des 2-Schraubers

Die Ausrüstung des 2-Schrauben-Schiffes mit ummantelten Festpropellern und die Installation des Antriebs in den Seitenrümpfen, bietet vom technischen Konzept her zahlreiche Vorteile wie

- Die Möglichkeit zur Vergrößerung des Propellerdurchmessers (Tunnelung)
- Die geschützte Lage des Propellers hinter dem Seitenrumpf
- Die sinnvolle Nutzung des Raums im SR-Hinterschiff
- Die Verwendung eines bewährten, störungsfreien Antriebssystems

Durch die gewählte Antriebslage ist die Formgebung des Hecks weitgehend festgelegt. Für die Unterbringung des Propellers am Seitenrumpf ist eine auflaufende Gillung Voraussetzung, wobei die S-Form die günstigsten Propulsionseigenschaften erwarten läßt und auch rein geometrisch den Propeller gut in die Rumpfform integriert. Für eine harmonische Tunnelführung bietet die symmetrische Heckform wiederum die besten Voraussetzungen. Zwangsläufig fordert diese Konstruktion des Seitenrumpfes aber auch eine entsprechende Formgebung des Mittelrumpfhecks. Insbesondere muß die Gillungslinie der Kontur des Seitenrumpfes angepaßt werden und erhält daher ebenfalls einen S-förmigen Verlauf.

Tatsächlich ist die Ausgangsvariante des Rheinschiffes nach diesen Kriterien entworfen worden (Anlagen 92 bis 94). Die Formgebung entspricht jedoch keineswegs den Strömungsverhältnissen, die aus der Einbringung des flach ausgeführten und hoch angeordneten Mittelrumpfes entstehen.

Hier soll versucht werden, die aus den Untersuchungen des Kanalschiffs gewonnenen diesbezüglichen Erkenntnisse zusammen mit den Ergebnissen aus den Detailuntersuchungen am Rheinschiff zu einer Übersicht zusammenzufassen, um zumindest eine gewisse Klärung der beobachteten, teilweise sehr komplex anmutenden Strömungsverhältnisse herbeizuführen. Nachfolgend sind die verschiedenen Einflußkriterien der Strömungsbildung nach Einzelpunkten geordnet dargestellt.

⁶ Mit der Formvariante 9, die den Abschluß der Untersuchungen bildete, wurden nur wenige Testversuche gefahren.

1) Form des Seitenrumpf-Hecks

Bedingt durch die flache, hochgezogene Form des Mittelrumpfes fehlt zwischen den Heckteilen der Seitenrumpfe Verdrängung, so daß das Wasser nach dem Kontinuitätsprinzip dazu neigt, in diesen Bereich zu strömen. Dies erklärt, warum bei symmetrischer Heckform der Boden des Seitenrumpfes schräg nach innen gerichtet überströmt wird.

Bei asymmetrisch ausgeführtem Seitenrumpf mit scharfem Ende treffen sich Innen- und Außenströmung unmittelbar am Ort des Stevens. Da dieser den hinteren Stau- punkt darstellt, kann die vereinigte Strömung nach hinten abfließen, ohne daß Unstetigkeiten entstehen. Das Prinzip einer Potentialströmung wird hiermit in idealer Weise nachgebildet. Die Strömung im Bereich des SR-Bodens richtet sich zwanglos nach der Mittellängsebene aus. Bei symmetrischem oder asymmetrischem Spiegelheck ist die Abflußbedingung nicht eindeutig definiert, so daß die schnellere Außenströmung dazu neigt, den SR-Spiegel zu umströmen und den Strömungsquerschnitt unterhalb des Mittelrumpfes zu versperren.

2) Einfluß der Propellerdrehung

Der arbeitende Propeller erzeugt eine Strahldrehung, so daß sich die Gesamtbewegung der Flüssigkeit im Strahl prinzipiell in Richtung des Druckseitenprofils abwickelt (vergleichbar mit einer Gewindeschraube). Die Bewegung entsteht bereits im Einzugsgebiet des Propellers (Vordrall).

Dreht der Propeller - wie hier gewählt - über oben nach innen, so erzeugt er in Schiffskörpfernähe (Tunneldach) eine schräg von innen nach außen gerichtete Strömung, die auf die oben genannte Bodenüberströmung eine kompensierende Wirkung ausübt. Das Auftreffen des abgehenden Strahls auf die feststehenden Ruderflächen hat einen Reflektionseffekt, so daß die Strömung dahinter wieder nach innen gerichtet ist.

Da die Kompensationswirkung nicht steuerbar ist, kann sich ein relativ komplexes Strömungsmuster einstellen, wobei möglicherweise auch noch Teile der Grundströmung erhalten bleiben.

3) Einfluß der Düsenzirkulation

Durch den optimierten, großen Öffnungswinkel bei üblichen Düsenkonstruktionen erzeugt das Düsenprofil im Innenbereich die angestrebte hohe Strahlgeschwindigkeit, während sich im Außenbereich Strömungsbewegungen einstellen, die der Anströmung entgegengerichtet sind (Zirkulation). Diese übertreffen in der Regel die Schiffsgeschwindigkeit, so daß bei der Interpretation von Wollfaden-Aufnahmen durch die der Anströmung entgegengerichteten Fäden fälschlich der Eindruck einer

gestörten Strömung entsteht. Das Phänomen kann einen erheblichen Teil der Düsenumgebung beeinflussen.

4) Die Form der Mittelrumpf-Heckgillung

Erfahrungsgemäß wird die Propulsionswirkung eines Propellers unter Flachwasserbedingungen durch eine S-förmige Heckgillungslinie begünstigt. Trägt der Schiffskörper jedoch, wie im Falle des Mittelrumpfes, kein Antriebsaggregat, kann man von einer negativen Wirkung ausgehen.

Grundsätzlich neigt die zähe Strömung im Hinterschiffsbereich dazu, sich wegen der Energieverluste in der Grenzschicht in Bereichen mit erwartetem Druckanstieg abzulösen. Zonen, in denen dieser Effekt auftreten kann, sind die Folgebereiche starker Krümmungen, d.h. die hintere Schulter an der Schiffsseitenwand oder - wie hier - der Übergang des Bodens in die Heckgillung. Folgt der konkaven Krümmung eine konvexe Form, wie sie durch die S-Linie dargestellt wird, so stellt letztere eine Zone mit verstärktem Druckanstieg dar, d.h. in der betrachteten Folge ist diese Zone für eine mögliche Ablösung der Strömung sogar begünstigt. Ist eine Ablösung aus konstruktiven Gründen unvermeidbar, wird man versuchen, die konvexe Krümmung möglichst an das Ende des Strömungskörpers zu verlegen, um die verlustreiche Wirbelströmung aus dem Körperbereich fernzuhalten und in das Nachlauf Feld zu verlegen (Prinzip der Abreißkante).

5) Einfluß der MR-Bodenhöhe

Betrachtet man bei gleicher Anströmgeschwindigkeit eine Stromlinie längs des MR-Bodens, so nimmt der geodätische Druckanteil der hierfür angesetzten Bernoulli-Gleichung mit einer Absenkung des Bodens, also vergrößertem Durchhang zu. Damit sinkt der Geschwindigkeitsdruck ab, d.h. die Übergeschwindigkeiten werden kleiner. Die Reduzierung der Geschwindigkeitsenergie vergrößert aber die Gefahr von Ablösungen im Bereich der MR-Heckgillung. Dies erklärt, warum die Anhebung des Bodens vom spezifischen Leistungsbedarf her prinzipiell eine Verbesserung darstellt, wenn man andere Einflüsse außer acht läßt.

9.4 Ergebnisse der Formvariation

Während in Abschn. 9.1 die insgesamt 9 Formvariationen in chronologischer Reihenfolge der tatsächlichen Ausführung dargestellt sind, werden hier die Ergebnisse in einer sachbezogenen Folge beschrieben. Danach sind die durchgeführten Versuche, die alle eine Modifikation der Hinterschiffsform betrafen, im wesentlichen in drei Gruppen zu untergliedern, die nachfolgend charakterisiert werden:

a) Formvariation auf der Basis der Ausgangsvariante

zugehörige Formvarianten: 1 , 2 , 5 und 6

Art der Variation :

Form der Gillungslinie des Mittelrumpfes (S-förmig, geradlinig)

Form des Seitenrumpfes (symmetrisch, asymmetrisch innen gerade, jeweils mit Spiegel)

Zusätzlicher Mittelpropeller

b) Formvariation bei vorgezogenem MR-Heck

SR symmetrisch mit Spiegel

zugehörige Formvarianten: 3 und 4

Art der Variation:

Form der Gillungslinie des Mittelrumpfes (S-förmig, geradlinig)

c) Formvariation am verlängerten Schiff

S-förmige MR-Heckgillung

zugehörige Formvarianten: 7 , 8 und 9

Art der Variation:

SR asymmetrisch, innen gerade, scharfer Steven

SR außen verschlankt, übertragende Tunnelschürze

SR-Tunnel zur Mitte verschoben, Außenkante gerundet

Die Ergebnisse aus Propulsions- und sporadisch durchgeführten Widerstandsversuchen sind den oben definierten Gruppen entsprechend grafisch zusammengefaßt worden, wobei in den zugehörigen Diagrammen jeweils auch die Ergebnisse für die Basisvariante als Referenz erscheinen. Die grafischen Darstellungen in der Art, wie in Abschn. 7 beschrieben, sind durch Strömungsaufnahmen ergänzt worden. Die Ergebnisse werden nachfolgend wiedergegeben.

Ergebnisse der Versuchsgruppe a)

- Formvariation auf der Basis der Ausgangsvariante - Anlagen 108 bis 116

Die in Anl. 114 wiedergegebenen Unterwasseraufnahmen der Basisvariante zeigen verglichen mit der Formvariante 6 des Kanalschiffes (Anl. 44) im Vorschiff erwartungsgemäß ein ähnliches, einfaches Strömungsbild, während sich die Hinterschiffs-umströmung durch einen sehr komplexen Verlauf mit unzureichender Qualität auszeichnet.

An der Außenseite des Seitenrumpfes weiter vor dem Propeller deutet sich die erwartete Schrägströmung an (Abschn. 9.1). Im Einzugsbereich des Propellers hat

der entgegengerichtete Vordrall eine überkompensierende Wirkung, so daß die Strömung leicht nach außen abgelenkt wird. Im Ruderbereich wird diese Strömung durch die Reflektionswirkung wieder nach innen abgelenkt. Maßgeblich unterstützt wird diese Ablenkung durch die nach innen gerichtete Umströmung des SR-Spiegels (s.a. Abschn. 9.3, Pkte. 1, 2).

Besonders ungünstige Effekte zeigen sich jedoch querab vom Propeller im Bereich des MR-Bodens. Hier geht die auflaufende Gillung in die konvex gekrümmte Zone über, die für eine Ablösung der Strömung prädestiniert ist (Abschn. 9.3, Pkt. 4). Da diese Tendenz durch die Sperrwirkung der SR-Spiegelumströmung unterstützt wird, geht die ursprünglich gleichmäßige Strömung in einen völlig ungerichteten Zustand über und läuft teilweise sogar der Fahrtrichtung entgegen.

Eine Begradigung der SR-Innenwand (Formvariante 2) und die zusätzliche Begradigung der MR-Heckgillungslinie (Formvariante 5) führten zu keiner nennenswerten Veränderung des Strömungsbildes (Anl. 115). Selbst die Installation einer dritten Antriebseinheit am Heck des Mittelrumpfes (Formvariante 6) beeinflusste die Strömung nur in unmittelbarer Umgebung des ummantelten Propellers (Anl. 116).

Offensichtlich werden durch die dominierende Sperrwirkung der um das SR-Spiegelheck geführten Außenströmung alle anderen Einflüsse überdeckt.

Erwartungsgemäß veränderten die genannten Detailänderungen den Leistungsbedarf nur mäßig (Anlagen 108 bis 110). Tendenzmäßig scheint die Kombination aus 2-S-Antrieb mit asymmetrischem SR-Heck und gerade auflaufender MR-Gillung (Formvariante 5) in der vorliegenden Gegenüberstellung die günstigste Form zu charakterisieren.

Geschätzt liegt die Leistungersparnis gegenüber der Ausgangsvariante für eine Testgeschwindigkeit von $V = 14 \text{ km/h}$ immerhin im Mittel bei $\Delta D - 16 \%$; $\Delta P_D - 17,5 \%$ (Anl. 110). Diese scheinbar günstigen Angaben dürften aber die realen Verhältnisse kaum zum Ausdruck bringen. Die Schwankungen der eingetragenen Ergebnisse von Mehrfachmessungen verdeutlichen einen ablösungsbedingt wenig stabilen Strömungszustand, so daß die Zahlenangaben nicht als besonders zuverlässig anzusehen sind.

Bemerkenswert ist die Feststellung, daß der dritte Propeller kaum Wirkung zeigt, wohl aber den hecklastigen Trimm und die Absenkung in nachteiliger Weise deutlich vergrößert (Anl. 108). Hinsichtlich der Leistungsumsetzung liegt die Formvariante 5 mit einem Gesamtgütegrad in der Größenordnung von $\eta_D \approx 0,4$ nicht schlecht (Anl. 109). Dieser Wert resultiert primär aus der Nachstromziffer, die - offensichtlich durch die strömungsverzögernde Ablösung verursacht - relativ hoch ausfällt und zu einem unverhältnismäßig hohen Schiffsgütegrad zwischen $\eta_H \approx 1,2$ und $\eta_H \approx 1,5$ führt. Der dritte Propeller begünstigt demgegenüber die Strömungsbedingungen, was in einem Absinken der Nachstromziffer zum Ausdruck kommt.

Ergebnisse der Versuchsgruppe b)

- Formvariation bei vorgezogenem MR-Heck - Anlagen 117 bis 121

Diese Versuchsreihe wurde u.a. auch durchgeführt, um die Strömungsverhältnisse für den Semikatamaran-Prototyp, der der Basisvariante des Rheinschiffs in weiten Teilen ähnlich ist, nachzubilden und zu überprüfen.

Die Unterwasseraufnahmen (Anl. 120) zeigen im Vergleich mit der Formvariante 1 (Anl. 114) hinsichtlich der Strömungsbildung keine grundsätzlichen Unterschiede. Bemerkenswert ist jedoch die Tatsache, daß die am Endbereich des MR-Bodens beobachteten Störungen unabhängig von der Vorverlegung des Hecks in fast unveränderter Form erhalten bleiben, obwohl die Entfernung vom Antriebssystem erheblich zugenommen hat. Diese Feststellung unterstützt die Annahme, daß es sich um den Ausdruck einer Strömungsablösung handelt (Abschn. 9.3, Pkte. 1, 4).

Die Leistungsunterschiede fallen bei dieser Versuchsgruppe noch geringer aus als bei der vorherigen. Tendenzmäßig stellen sich bei der Formvariante 4 mit gerade geführter MR-Heckgillung gegenüber der Ausgangsvariante 1 (S-förmige Gillung) leichte Vorteile ein, während die Variante 3 einen leicht erhöhten spezifischen Leistungsbedarf hat (Anl. 119). Dies gilt jedoch nur bis zur Testgeschwindigkeit $V = 14 \text{ km/h}$. Hier ergibt sich praktisch ein Gleichstand, während darüber hinaus sogar die Ausgangsvariante vorzuziehen wäre.

Das Ergebnis deutet an, daß die vorgezogene Ablösungszone die Umströmung der nachgeführten SR-Heckteile bei höherer Geschwindigkeit nachteilig beeinflusst. Dies bestätigt die bekannte Regel, unvermeidbare Ablösungseffekte möglichst ans Ende des Strömungskörpers zu verlagern.

Aus hydrodynamischer Sicht stellt das Konzept des Semikatamarans mit vorgezogenem MR-Heck besonders für die Auslegung auf höhere Spitzengeschwindigkeiten keine Alternative dar.

Grundsätzlich bestätigen die Ergebnisse aber hinsichtlich der MR-Heckform die bereits unter Punkt a) gewonnene Aussage, daß - falls der Mittelrumpf keinen Antrieb trägt - die gerade geführte Gillungslinie der S-Form vorzuziehen ist. Allerdings sind die dadurch erzielten Leistungsreduzierungen gering.

Ergebnisse der Versuchsgruppe c)

- Formvariation am verlängerten Schiff - Anlagen 122 bis 131

Die Unterwasseraufnahmen (Anlagen 127, 129 und 131) dokumentieren, daß sich der Strömungsverlauf am Hinterschiff durch die Veränderung der SR-Form einschließlich der Verlängerung gegenüber der Ausgangsform (Anl. 114) grundsätzlich verbessert hat. Der Hauptunterschied besteht darin, daß durch das Entfernen der

SR-Spiegel erheblich günstigere Abfließbedingungen erzielt worden sind (siehe Abschn. 9.3, Pkt. 1), so daß auch im Bereich des MR-Spiegels die Strömung weitgehend gleichgerichtet ist.

Im Bereich des SR-Bodens hat die Strömung einen Verlauf, deren Ausrichtung in Anbetracht des Propeller-Düsen-Einflusses (Abschn. 9.3, Pkte 2, 3) wahrscheinlich kaum oder nur wenig zu verbessern sein dürfte. Interessant sind in diesem Zusammenhang die beim Schleppversuch (ohne Propeller) aufgenommenen Fotos (Anlagen 127 unten, 129 unten), die die Aussagen der oben angeführten Punkte 2 und 3 bezüglich dieses Einflusses weitgehend bestätigen.

Ein gewisser neuralgischer Punkt bleibt der Bereich des MR-Bodens mit konvexer Krümmung (Zone zwischen den Propellern), der den Übergang vom auflaufenden zum horizontal verlaufenden Teil der Gillung darstellt. Hier treten lokale Ablösungen auf, die zum Heck hin offensichtlich wieder in eine anliegende (aber stärker turbulente) Strömung übergehen (s.a. Abschn. 9.3, Pkt. 4). Durch Vergleich der Bilder beider Versuchsarten (Propulsion, Widerstand) in den Anlagen 127 und 129 kann man feststellen, daß der Ablösungseffekt in einem gewissen Bereich nahe der Düse durch den Zirkulationseffekt überlagert wird (Abschn. 9.3, Pkt. 3).

In der Darstellung der Propulsionsergebnisse zeigt sich die Verbesserung der Schiffsform in einer spürbaren Absenkung der aufzuwendenden (spezifischen) Leistung (Anlagen 122, 124), wobei auch eine höhere Qualität der Meßpunkte im Vergleich mit den Ergebnissen der Versuchsgruppe a) festzustellen ist, was die günstigere Hinterschiffsumströmung indirekt bestätigt.

Hinsichtlich der drei Varianten der Versuchsgruppe c) ist festzustellen, daß die Verschlangung des SR-Hinterschiffes im Bereich der Testgeschwindigkeit $V = 14 \text{ km/h}$ bezogen auf die Variante 7 leistungsmäßig eher leichte Nachteile bewirkt hat. Allerdings scheinen die Varianten 8 und 9 höhere Spitzengeschwindigkeiten zu erzielen, was sich im entsprechenden Vergleich durch die geringere Steigung der Leistungskurven im oberen Endbereich andeutet.

In den Unterwasseraufnahmen (Anlagen 127, 129 und 131) treten nur geringe Unterschiede auf, wobei die relativ beste Strömungsqualität tendenzmäßig der Variante 9 zuzuordnen wäre.

Bezogen auf die Formvariante 1 ergeben sich für die Variante 8, die nachfolgend auch für die Serienversuche eingesetzt wurde, bei der Testgeschwindigkeit $V = 14 \text{ km/h}$ Leistungseinsparungen von $\Delta P_D - 14 \%$; $P_D - 15 \%$ (Anl. 124). Hierzu ist jedoch festzustellen, daß ein Teil der Verbesserung auch dem Einfluß des um ca. 7 % vergrößerten L/B -Verhältnisses zugeschrieben werden muß (siehe Abschn. 4.1, Gl. (4.1.6)).

In der Propulsionsanalyse (Anl. 123) weist die neue Schiffsform bezüglich des Schiffseinflußgrades mit η_H 1,3 bis η_H 1,45 beachtliche Werte auf. Der Gütegrad

der Anordnung bewegt sich jedoch nur bei Werten um $R = 0,95$, so daß der Gesamtgütegrad Werte von $D = 0,45$ nicht übersteigt.

9.5 Ergänzungen

In den Anlagen 132 bis 138 sind die Ergebnisse für die Formvariante 5A in Gegenüberstellung zur Formvariante 5 wiedergegeben. Beide unterscheiden sich nur durch die Einstellung der MR-Höhenlage, die von der Standardeinstellung h_{MR2} ($h_{MR} = 1,0\text{ m}$) auf h_{MR3} ($h_{MR} = 1,5\text{ m}$) vergrößert wurde. Die Untersuchung stellt eine abgekürzte Form der am Beispiel des Kanalschiffs durchgeführten Variation dar, die in den Abschnitten 8.3 und 8.4 beschrieben ist.

Das Modell weist die als günstig herausgestellte gerade geführte Heckgillungslinie des Mittelrumpfes auf. Ansonsten besitzt es bei asymmetrischem, mit Spiegel ausgerüstetem SR-Heck eine Form, die in Abschn. 9.4 als nicht empfehlenswert charakterisiert worden ist.

Unter diesem Aspekt ist die positive Leistungsentwicklung, die in den Anlagen 132 bis 134 zum Ausdruck kommt, als überraschend zu werten. So ist im Spitzenbereich eine Geschwindigkeitssteigerung mit einem Wert von nahezu $V = 1\text{ km/h}$ zu verzeichnen. Die Leistungsreduktion liegt bezogen auf die Variante 5 für die Testgeschwindigkeit $V = 14\text{ km/h}$ in der Größenordnung von $D = -18\%$; $P_D = -27\%$ (Anl. 134). Bezieht man die Werte wie bisher auf die Ausgangsvariante 1 (Anl. 110), so ergibt sich ein hoher Leistungsgewinn in der beachtlichen Größenordnung von $D = -31\%$; $P_D = -40\%$.

Absolut gesehen liegt die erzielte spezifische Leistung der Formvariante 5A bei einem Wert von $D = 8,8 \cdot 10^{-3}$, während sich der entsprechende Wert der optimierten Formvariante 8 immerhin nur bei einem Wert von $D = 10,9 \cdot 10^{-3}$ bewegt (Anl. 124). Dabei ist zu betonen, daß der erste Wert ausschließlich auf einer Formänderung basiert, da sich die Hauptabmessungen nicht verändert haben. Bei der Variante 8 würde die Reduzierung aus der um ca. 7 % vergrößerten Länge zusätzlich noch eine leichte Erhöhung des angegebenen Wertes ergeben (s.a. Abschn. 4.1), so daß der Unterschied noch größer ausfallen würde.

Die Ursache der Leistungsreduzierung liegt im wesentlichen im Anstieg des Gesamtgütegrades, denn in der Darstellung des spezifischen Widerstandes zeigen sich nur geringe Unterschiede (Anl. 136). Die Zunahme von $D = 0,45$ auf $D = 0,50$ resultiert aus einer Verbesserung des Gütegrades der Anordnung, im wesentlichen aber auf einem starken Anwachsen der Nachstromziffer, die zu einem besonders hohen Schiffseinflußgrad mit Spitzenwerten bis zu $H = 2,2$ führt.

Die Darstellung verdeutlicht, daß die unmittelbare Ursache eine Verbesserung der Hinterschiffsumströmung sein muß, was ein Vergleich der Unterwasseraufnahmen

(Anlagen 137 und 138) mit denen der Variante 5 (Anl. 115 unten) auch deutlich zum Ausdruck bringt.

Das vorliegende Beispiel kennzeichnet den Parameter der MR-Höhenlage h_{MR} als eine Einflußgröße, die die Strömungseigenschaften des Semikatamarans maßgeblich bestimmt. Im wesentlichen gelten als Erklärung für die erzielten Verbesserungen die Ausführungen unter Abschn. 9.3, Pkt. 5. Das Anwachsen der Nachstromziffer mit zunehmender MR-Höhenlage stellt in diesem Sinne scheinbar einen Widerspruch dar, erklärt sich aber aus der überlagerten Sperrwirkung des SR-Spiegels, wodurch die MR-Strömung verzögert wird (Abschn. 9.3, Pkt. 1). Diese Verzögerung ist hier jedoch nicht so stark, daß Ablösungen unterhalb des MR-Bodens entstehen, sondern höchstens weiter stromab außerhalb des Schiffskörperbereichs.

Obwohl die Variation der MR-Höhenlage (Anl. 134) hier nur fragmentarisch durchgeführt wurde, deutet sich in den Ergebnissen eine andere Kurvencharakteristik an, als sie in den vergleichbaren Ergebnissen für das Kanalschiff (Anlagen 15, 20 und 25) erscheint. Insbesondere das Fehlen der Kurvenüberschneidungen und das starke Absinken der spezifischen Leistungswerte bei vergrößerter MR-Höhe über dem gesamten untersuchten Geschwindigkeitsbereich läßt vermuten, daß dies ein Ausdruck sprunghaft veränderter Strömungsverhältnisse im Hinterschiffsbereich ist. Demgegenüber würde die Stetigkeit der dem Kanalschiff zugeordneten Darstellungen eine harmonische Veränderung kennzeichnen.

Es spricht vieles dafür, daß die Ausbildung der Hinterschiffsumströmung unter Flachwasserbedingungen - verallgemeinert betrachtet - maßgeblich von dem Verhältnis aus Schiffsbreite zu Wassertiefe bestimmt wird, wobei auch Beispiele aus anderen Untersuchungen zeigen, daß das Ablösungsproblem mit wachsender Schiffsbreite generell zunimmt. Dieses würde zumindest andeutungsweise die Probleme und Schwierigkeiten bei der Gestaltung des Rheinschiffes erklären, das sich von dem ähnlichen Kanalschiff hauptsächlich durch die verdoppelte Breite unterscheidet.

Aus der Betrachtung läßt sich ableiten, daß die Variation der MR-Höhenlage ein wesentlicher Bestandteil der Optimierungsaufgabe ist. Weiterhin ist festzustellen, daß eine optimierte Einstellung der MR-Höhe nicht verallgemeinert werden kann sondern sowohl von den Hauptabmessungen als auch von der Formgebung der Schiffsenden bestimmt wird.

9.6 Serienversuche

Die Anlagen 139 bis 153 zeigen die Ergebnisse der Serienversuche, die mit der Formvariante 8 des „**Rheinschiffs**“ in der Ausführung der modifizierten Basislänge $L1$ ($L_{OA} = 118,0\text{ m}$) für den Fall „unbegrenzte Fahrwasserbreite“ durchgeführt wurden. Auf die ursprünglich geplante Längenvariation mußte, wie bereits in Abschn. 9.2 erwähnt, verzichtet werden. Sämtliche Propulsionsversuche wurden durch Widerstandsversuche ergänzt, so daß eine vollständige Propulsionsanalyse durchgeführt werden konnte.

In der nachfolgenden Tabelle ist die Systematik der Versuche wiedergegeben.

Unbegrenzte Fahrwasserbreite

		Bez.		L1	
		$L_{OA} [m]$		118,0	
Bez.	$h[m]$	Bez.	$T[m]$	Anlagen-Nr./ Versuchsart	
h1	4,0	T1	2,8	139 - 143	P, W
		T2	2,4	139 - 143	P, W
		T3	2,0	139 - 143	P, W
h2	7,5	T1	2,8	144 - 148	P, W
		T2	2,4	--	
		T3	2,0	144 - 148	P, W
h3	10,0	T1	2,8	149 - 153	P, W
		T2	2,4	--	
		T3	2,0	149 - 153	P, W

(P = Propulsion, W = Widerstand)

Im Unterschied zum Kanalschiff zeigt das Rheinschiff ein Trimmverhalten, bei dem der Wechsel von kopflastigen zu steuerlastigen Werten deutlicher ausgeprägt ist und damit dem eines Einrumpfschiffes nahe kommt. Dies dürfte Ausdruck des eher konservativen Antriebs in Gegenüberstellung zu dem exponiert angeordneten Z-Antrieb des Kanalschiffs sein.

Auch in der Darstellung der Propulsionsanalyse zeigen die Kurven der einzelnen Kenngrößen eher konservative Verlaufsformen, die sich erst bei geringem Tiefgang einen atypischen Charakter erhalten.

Bezogen auf den Konstruktionstiefgang von $T = 2,8 m$ erzielt das Rheinschiff je nach Wassertiefe Gesamtgütegrade in der Größenordnung von $D_{0,4}$ bis $D_{0,5}$ (Anlagen 140, 145 und 150). Dies ist für Binnenschiffe ein durchaus gutes Ergebnis, das jedoch nicht an die Spitzenwerte des Kanalschiffes (Abschn. 8.7) heranreicht. Das Ergebnis basiert im wesentlichen auf den recht hohen Werten des Schiffseinflußgrades in der Größenordnung von $H_{1,4}$ bis $H_{1,2}$ und dem günstigen Gütegrad der Anordnung in der Größenordnung von $R_{0,9}$ bis $R_{0,95}$, worin eine gute Qualität der Propelleranströmung zum Ausdruck kommt.

10. Vergleich mit anderen Fahrzeugen

Um einen Eindruck von den Fahrleistungen der neu entwickelten Formen des Semikatamarans zu vermitteln, sind zwei besonders interessante Kenngrößen der vorliegenden Propulsionsergebnisse entsprechenden Daten von Vergleichsschiffen gegenübergestellt worden.

Diese sind

- 1) Die spezifische Leistung in der Definition von Gl. (4.1.3)
- 2) Die Propeller-Flächenbelastung in der Definition

$$C_{PD} = \frac{P_D}{A_0} \quad [kW / m^2] \quad (10.1)$$

Gl. (10.1) stellt eine Übersichtsformel dar, mit der sich die Kavitationsgefährdung eines Binnenschiffspropellers grob abschätzen läßt. Bei modernen Propellerkonstruktionen können Spitzenwerte von $350 [kW/m^2]$ C_{PD} $400 [kW/m^2]$ als vertretbar angesehen werden. Die Formel läßt sich z.B. anwenden, um den erforderlichen Durchmesser oder die Anzahl der einzusetzenden Propeller abzuschätzen.

Beide Größen sind jeweils als Funktion der Fahrgeschwindigkeit dargestellt worden.

Die Anlage 154 zeigt die Ergebnisse der Vergleichsbetrachtung für das **Kanalschiff** bei unbegrenzter Fahrwasserbreite. Hier ist den drei Längenvarianten eine Gruppe von konventionellen Einrumpfschiffen, bestehend aus drei Längenvarianten eines Motorgüterschiffes, einer Kombination aus der größten Variante des Motorgüterschiffes mit einem Leichter (Motorgüterschiff-Koppelverband) sowie eines einspurigen, zweigliedrigen „Kanal“-Schubverbandes gegenübergestellt (aus *Grollius, 1996*). Das Motorgüterschiff besitzt mit $B = 11,45 \text{ m}$ nahezu die gleiche Breite wie der Semikatamaran, der Schubverband ist mit $B = 9,5 \text{ m}$ um ca. 2 m schmaler.

Kennzeichnend für das Motorgüterschiff ist sein besonders geringer Leistungsbedarf, der durch ein sehr schlankes Hinterschiff und einen extrem großen Propeller erzielt wurde. Die Darstellung enthält als Ergänzung den Entwurf des Rheinschiffes, um den Einfluß der verdoppelten Breite zu demonstrieren.

Die Anlage 155 zeigt die im wesentlichen gleiche Gegenüberstellung für die Fahrt im Standard-Rechteck-Kanal. Hier fehlen die beiden kürzeren Varianten des Motorgüterschiffes, während der um einen Leichter verkürzte „Kanal“-Schubverband hinzugekommen ist.

Die Anlage 156 enthält die Ergebnisse des **Rheinschiffes** im Vergleich mit zwei Längenvarianten des früher untersuchten Semikatamaran-Prototyps (*Grollius und Heuser, 1992*).

Grundsätzlich soll festgehalten werden, daß alle der gezeigten Kurvendarstellungen in ihrem Umfang mehr oder weniger genau die physikalisch erreichbare Grenzgeschwindigkeit zum Ausdruck bringen (Abschn. 4.4). Dies besagt, daß bei den zugrunde liegenden Versuchsreihen die Geschwindigkeit jeweils so weit ausgefahren wurde, bis die Fahrt wegen übergroßer Heckwellenentwicklung oder wegen Grundberührung abgebrochen werden mußte.

Generell bringen alle drei Darstellungen zum Ausdruck, daß das ursprüngliche Ziel der Untersuchung, nämlich nach dem Konzept des Semikatamarans ein Transportfahrzeug zu entwickeln, das deutlich schneller ist als konventionelle Einrumpfschiffe, erreicht werden konnte. Dies gilt auch für die noch nicht abgeschlossene Entwicklung des Rheinschiffes, das gegenüber seiner Vorläuferversion einen deutlichen Geschwindigkeitsvorteil aufweist. Allerdings ist der Gewinn, wie das Beispiel des Kanalschiffes zeigt, erwartungsgemäß mit einem Anstieg der spezifischen Leistung verbunden. Im Geschwindigkeitsbereich der konventionellen Schiffe bewegt sich der Leistungsaufwand dagegen in durchaus üblichen Größenordnungen, wenn man einmal von dem besonders leistungsarmen Motorgüterschiff als Einzelfahrer absieht.

Auf einige interessante Details der einzelnen Diagramme wird nachfolgend näher eingegangen.

Kanalschiff, unbegrenzte Fahrwasserbreite (Anl. 154)

Die Beispiele des einzeln fahrenden Motorgüterschiffes und des Semikatamarans dokumentieren, daß eine Verlängerung eine positive Reduzierung der spezifischen Leistung bewirkt. In der Umkehrung dieser Feststellung sind Schiffe mit einer Länge von $L_{OA} < 80,0$ m bei einer Standardbreite von $B = 11,4$ m ($L/B < 7,0$) offensichtlich besonders benachteiligt, wie das Beispiel des 60-m-Semikatamarans zeigt. Der Trend der erreichbaren Höchstgeschwindigkeit verläuft beim Semikatamaran in derselben Weise, d.h., die längeren Schiffe laufen schneller. Unter diesem Aspekt hat die relativ geringere Höchstgeschwindigkeit des Rheinschiffes aufgrund des niedrigen Längen-Breitenverhältnisses von $L/B = 5,18$ einen durchaus realen physikalischen Hintergrund. Beim Motorgüterschiff verläuft der Trend der Spitzengeschwindigkeit scheinbar umgekehrt. Dies beruht jedoch offensichtlich auf einem im Gegensatz zum Semikatamaran ausgeprägten Trimmverhalten. Wie die Darstellung der Propellerbelastung zeigt, kann die Leistung des Motorgüterschiffs nicht ausgefahren werden, sondern muß mit zunehmender Länge immer weiter zurückgenommen werden, was auf eine verstärkte Neigung zur Grundberührung hindeutet.

Kanalschiff, Standard-Rechteck-Kanal (Anl. 155)

Die beschränkte Fahrwasserbreite hat einen geringen, aber eindeutigen Einfluß auf die erreichbare Höchstgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Schiffslänge. Wie aus der Darstellung des Semikatamarans hervorgeht, verläuft ihre Entwicklung, konträr zu dem Fall der unbegrenzten Fahrwasserbreite, mit steigender Länge zu leicht sinkenden Werten, so daß der 60-m-Semikatamaran tatsächlich das schnellste Schiff der untersuchten Reihe darstellt.

Bemerkenswert ist die Feststellung, daß konventionelle Schiffe nur in die Nähe des durch den Semikatamaran ($B = 11,4$ m) vorgegebenen Spitzengeschwindigkeits-

bereich vorstoßen können, wenn ihre Breite deutlich kleiner ist. Dies wird durch die kurze, eingliedrige Formation des „Kanal“-Schubverbandes ($B = 9,5 \text{ m}$) belegt.

Rheinschiff, unbegrenzte Fahrwasserbreite (Anl. 156)

Die wirtschaftlichen Vorzüge des Semikatamaran-Prototyps gegenüber konventionellen Einrumpfschiffen waren bereits in der zugehörigen Untersuchung herausgestellt worden (*Grollius und Heuser, 1992*). Die Gegenüberstellung des Rheinschiffes (Formvariante 8) und zweier Längenvarianten des älteren Typs belegt, daß die neue Form vergleichbare spezifische Leistungswerte aufweist, aber deutlich höhere Geschwindigkeiten fahren kann. Insbesondere die Ausführungen unter Abschn. 9.5 lassen vermuten, daß diese Vorteile noch weiter gesteigert werden können.

11. Wellen und Bodendruck

11.1 Auswertung

In Abschn. 4.4 sind Grundlagen zum Thema „Strömungsfeld des Schiffskörpers“ und Hinweise zur Auswertung und Darstellung von Messungen der Oberflächenverformung und des Bodendrucks beschrieben. Dabei werden auch verallgemeinerungsfähige Vorschläge gemacht, wie zum Thema „Schwell“ Schlepptank-bezogene Modellmessungen relativiert werden können, um eine Vergleichsbasis für unterschiedliche Schiffsformen zu schaffen.

Zunächst soll hier anhand von typischen Messungen das angewendete Auswertungsverfahren näher erläutert werden.

Die Anlagen 157 und 158 zeigen Messungen von Oberflächenverformung und Bodendruck jeweils für Längsschnitte in Tankwandnähe und in der Fahrspur (= Tankmitte). Aufgetragen sind über der dimensionslosen Längskoordinate des schiffsfesten Systems jeweils die umgerechneten Absolutwerte und die zugehörigen Beiwerte entsprechend Gl. (4.4.5) und Gl. (4.4.4). Die Diagramme charakterisieren die Auswirkungen einer Variation der Schiffslänge (hier: Kanalschiff) auf die Meßgrößen bei konstanter F_{nh} -Zahl, d.h. bei gleicher Geschwindigkeit für feste Werte von Wassertiefe und Tiefgang.

Die eingetragenen Zahlenfolgen kennzeichnen die Ordinaten, die für die weiteren Betrachtungen den kontinuierlichen Meßaufzeichnungen entnommen worden sind.

Nachfolgend sind die Definitionen der zugeordneten Ordinaten in der entsprechenden Reihenfolge wiedergegeben:

Oberflächenverformung (Anl. 157)

- 1) aperiodischer Anteil η_M (maximale Einsenkung der Mittschiffsmulde)
- 2) Doppelamplitude η_w der Bugwellenfront (indiziert durch den Durchgang des Strahls des Kelvinwinkels, abgesetzt vom Bug ($\eta = X/(L/2) = -1$))
- 3) Doppelamplitude η_w der Heckwellenfront (indiziert durch den Durchgang des Strahls des Kelvinwinkels, abgesetzt vom Heck ($\eta = X/(L/2) = +1$))

Zu 2 und 3 ist zu bemerken, daß die Eintragung des Winkelstrahls nur als Orientierungshilfe diene. Ausgewertet wurden die jeweils nächstliegenden Maximalamplituden.

Bodendruck (Anl. 158)

- 1) Überdruckspitze Bugsektion
- 2) Unterdruckspitze Bugsektion
- 3) Unterdruckspitze Hecksektion
- 4) Überdruckspitze Hecksektion

Das beschriebene Verfahren ermöglicht eine geschlossene Darstellung von Meßergebnissen aus einer Wassertiefenvariation und ist dementsprechend auf die Untersuchungen des Falls „unbeschränkte Fahrwasserbreite“ angewendet worden. Der Fall „Kanalfahrt“ wurde in der weiter oben beschriebenen Ausgangsform dargestellt (s.a. Abschn. 11.2.2).

11.2 Ergebnisse

11.2.1 Vergleich Kanalschiff - Rheinschiff

Anl. 159 zeigt die Ergebnisse der Auswertung eines Wellenlängsschnittes, der in unmittelbarer Nähe der Tankwand (= Ufernähe) aufgenommen worden war. Dargestellt sind nur die Doppelamplituden von Bug- und Heckwellenfront. Die Muldeneinsenkung ist im vorliegenden Fall bei einem Abstand zum Schiffskörper von umgerechnet $Y = 77\text{ m}$ sehr klein, so daß auf eine Wiedergabe verzichtet wurde.

Das Diagramm enthält eine Zusammenstellung von Ergebnissen aller untersuchten Wassertiefen sowohl für das Kanalschiff einschließlich seiner verschiedenen Längenvarianten, als auch für das Rheinschiff. Konstante Einflußgrößen sind der Tiefgang und die Froudesche Tiefenzahl. Letztere wird festgehalten, um den wassertiefenabhängigen dynamischen Zustand der unterkritischen Flachwasserfahrt in physikalisch adäquater Form wiederzugeben.

Die Auftragung der gemessenen Doppelamplituden über der quadrierten Fahrgeschwindigkeit zeigt als bemerkenswertes Ergebnis dieser Auftragung einen linearen Zusammenhang zwischen beiden Größen, der besonders in der Darstellung der Bugwellenfront zum Ausdruck kommt. Die weniger eindeutige Darstellung der Heckwellenfront ist möglicherweise auf Interferenzeffekte zwischen den Wellensystemen (Einfluß der „wellenbildenden Länge“) zurückzuführen. Dieses Ergebnis bestätigt, daß für die in Abschn. 4.4 durchgeführte formale Normierung der Bernoulligleichung eine gewisse physikalische Berechtigung besteht (siehe insbesondere Gl. (4.4.5)).

Ebenso wie die Schiffslänge scheint auch die Breite einen relativ geringen Einfluß auf die Wellenentwicklung zu haben, wie aus den Heckwellenergebnissen für das Rheinschiff hervorgeht. Unerklärlich bleibt bei diesem Beispiel jedoch die schwache Ausbildung des Bugwellensystems, das vollkommen aus den übrigen Ergebnissen herausfällt.

Analog zur Darstellung der Oberflächenverformung ist in Anl. 160 die Auswertung des zugehörigen Bodendrucklängsschnittes für die Fahrspur des Schiffes dargestellt. Entsprechend Gl. (4.4.4) sind hier die gemessenen Druckdifferenzen über dem Kehrwert der quadrierten Fahrgeschwindigkeit aufgetragen, so daß der Grenzfall des verschwindenden Bodendrucks für h in der Form des Nullpunkts die darzustellenden Funktionen ergänzt.

Tatsächlich ergeben sich aus der Auswertung der vier ausgewählten Extremwerte jeweils sehr eng begrenzte Kurvenbänder mit ähnlicher Charakteristik, die, aus dem Nullpunkt heraus aufsteigend, asymptotisch einem Grenzwert zustreben. Auffällig ist, daß die Kurven der Druckmaxima, unabhängig von Schiffslänge und -typ, sehr eng zusammenliegen, während die Minima eine Staffelung zeigen, wonach mit sinkendem L/B -Verhältnis die Unterdrücke ansteigen. In diese Charakteristik fügt sich das breite Rheinschiff völlig ein, das verglichen mit dem Kanalschiff nahezu identische Überdrucke, jedoch wesentlich höhere Unterdrücke aufweist.

Ergänzend sind die in den Anlagen 159 und 160 dargestellten Ergebnisse in eine dimensionslose Form umgezeichnet worden (Anlagen 161 und 162). Darin sind die Wellen- und Druckbeiwerte in der Form von Gl. (4.4.5) und Gl. (4.4.4) über einer entsprechenden dimensionslosen Funktion der Geschwindigkeit dargestellt, die formal aus F_n -Zahl und L/T -Verhältnis gebildet wurde.

11.2.2 Vergleich mit anderen Fahrzeugen

Wellen- und Bodendruckmessungen sind Sonderversuche, die seltener stattfinden und von der Art der Durchführung her noch keiner Normung unterliegen. Unter diesen Umständen war es problematisch, geeignetes Vergleichsmaterial zu finden, wodurch sich auch der fragmentarische Charakter der nachfolgend dargestellten Ergebnisse erklärt.

Seitlich unbegrenztes Fahrwasser

Für diesen Fall konnten Messungen an einem Einrumpfschiff bereitgestellt werden, das hinsichtlich Länge, Breite und Tiefgang dem 110-m-Kanalschiff sehr ähnlich ist. Die aus einem laufenden Forschungsvorhaben stammenden Messungen beinhalten auch eine Wassertiefenvariation. Die Wellenmessungen waren jedoch auf das schiffsnahe Umfeld begrenzt, so daß auf einen Wellenlängsschnitt zurückgegriffen werden mußte, der umgerechnet mit $Y = 40,0 \text{ m}$ relativ nahe der Fahrwassermitte liegt. Bei diesem mäßigen Abstand vom Schiffskörper verläuft die Bugwellenfront noch innerhalb der Mittschiffsmulde, die hier auch eine deutliche Einsenkung aufweist und deshalb in die Auswertung einbezogen worden ist.

Die Ergebnisse sind in Anl. 163 wiedergegeben und können wegen identischer Froudescher Tiefenzahl unmittelbar mit dem in Anl. 159 dargestellten Wellenlängsschnitt verglichen werden. Bezogen auf das Kanalschiff ist aus der Gegenüberstellung zu entnehmen, daß die Wellenamplituden mit zunehmendem Abstand vom Schiffskörper wachsen, wobei auch der Anstieg selbst mit der Wassertiefe etwa linear zunimmt. Diese Tendenz könnte eine Auswirkung der begrenzten Schlepp-tank-Breite sein (Spiegelungseffekt)⁷.

Als wesentliches Ergebnis zeigt das Diagramm, daß die Wellenanteile der Oberflächenverformung für beide Schiffstypen eine ähnliche Größenordnung aufweisen, wobei der Semikatamaran zu leicht vergrößerten Werten tendiert. Umgekehrt zeigt dagegen das Einrumpfschiff eine größere Einsenkung der Mittschiffsmulde.

Aus der Darstellung der Bodendrucke in der Mittellängsspur (Anl. 164) ergibt sich ein Bild, das deutlich zugunsten des Semikatamarans ausfällt. Generell erzeugt das Einrumpfschiff größere Über- und Unterdrücke, wobei besonders im Vorschiff Unterdruckspitzen auftreten, die die Werte des Semikatamarans im Bereich kleinerer Wassertiefen um mehr als das Doppelte übersteigen. Darin kommt offensichtlich die verringerte Verdrängungswirkung im Bereich des erhöhten MR-Bodens zum Ausdruck.

⁷ In diesem Punkt besteht auch in Hinblick auf eine Definition des Schwells unter Modellversuchsbedingungen (siehe Abschn. 4.4) noch Klärungsbedarf.

Standard-Rechteck-Kanal

In den Anlagen 165 und 166 sind die Ergebnisse von Wellen- und Bodendruckmessungen im Modell-Kanal als vollständige Längsschnittprofile dargestellt. Die einzelnen Kurven kennzeichnen die untersuchten Längsvarianten des Kanalschiffes. Obwohl der wiedergegebene Fall dem niedrigeren Geschwindigkeitsniveau im Kanal angepaßt ist, kann die Darstellung über die angegebenen Beiwerte qualitativ recht gut mit den entsprechenden Auftragungen für den Fall des seitlich unbegrenzten Fahrwassers (Anlagen 157 und 158) verglichen werden, zumal sich beide durch eine identische Wassertiefe auszeichnen.

Betrachtet man die beiden Wellenlängsschnitte unter dem Gesichtspunkt des erzeugten Schwells, so bewirkt die sehr eingeschränkte Fahrwasserbreite des Kanals eine gravierende Veränderung der Oberflächenverformung. Diese äußert sich vor allem in einer starken Vergrößerung der Mittschiffsmulde, wobei am Rand des Fahrwassers, verglichen mit dem Fall „unbeschränkte Fahrwasserbreite“, beiwertbezogen eine um das nahezu Sechsfache vergrößerte Absenkung des Wasserspiegels entsteht. Demgegenüber steigen die Amplitudenbeiwerte der Oberflächenwellen nur etwa auf das Doppelte an.

Bei den Bodendrücken zeigt sich eine Änderung der Charakteristik. Besonders auffällig ist das Verschwinden der Überdruckspitzen. Die beiden Unterdruckspitzen vereinigen sich in einem Minimum nahe dem Heck. Bezogen auf den Vergleichsfall erreicht der Unterdruck in diesem Punkt nahezu den zweifachen Wert.

Bezüglich der Längenvariation zeigen sich ebenfalls veränderte Tendenzen, die besonders in der Ausbildung der Mulde und in den Bodendrücken sichtbar werden. Bei seitlich unbeschränktem Fahrwasser verändert sich die Mulde kaum, die Bodendrücke tendieren mit kleinerer Länge zu höheren Werten. Im Falle des Kanals geht die Muldeneinsenkung mit verkürzter Länge zurück und die Bodendrücke verändern sich dabei mit umgekehrter Tendenz in Richtung kleinerer Werte. Dies spricht für den Einsatz von kürzeren Schiffen im Kanal, zumal diese auch höhere Geschwindigkeiten erwarten lassen (s.a. Abschn. 10).

Für einen Vergleich des Semikatamarans mit einem Einrumpfschiff konnten aus einem abgeschlossenen Vorhaben einige Daten entnommen werden, die die Fahrt des Typschiffes „J. Welker“ in dem untersuchten Kanalprofil charakterisieren (*Broß, 1991*). Die Eintragungen sind vergleichbar mit der 85-m-Variante des Kanalschiffes (Anlagen 165 und 166). Stellt man zum Ausgleich der vorhandenen Geschwindigkeitsdifferenz die zugehörigen Beiwerte gegenüber, so weist das Einrumpfschiff trotz einer um fast 2 m geringeren Breite eine fast gleiche Muldeneinsenkung wie der Semikatamaran auf und erzeugt im Bodenbereich Unterdrücke, die seine entsprechenden Werte um das 1,1-fache übersteigen.

Aufgrund der erhöhten Verdrängungswirkung würde demnach der Vergleich mit einem Einrumpf-Schiff identischer Breite noch deutlicher zugunsten des Semikatamarans ausfallen.

12. Theoretische Berechnungen

Im Rahmen der recht aufwendigen modellgestützten Formoptimierung der untersuchten Semikatamaran-Varianten entstand die Vorstellung, daß es grundsätzlich möglich sein müsse, den nach dem Try-And-Error-Prinzip abgewickelten Vorgang mit einem CFD-Strömungsmodell auf einem Digitalrechner nachzubilden. Dabei wurde von der Forderung ausgegangen, daß einerseits die Entwicklung des Gittermodells nicht zuviel Zeit erfordern dürfe und sich andererseits der Rechenaufwand in erträglichen Grenzen bewegen müsse.

Unter diesen Gesichtspunkten erschien es ausreichend, das Berechnungsproblem auf eine qualitative Aussage zu reduzieren. Inspiriert von der erfolgreichen Anwendung der „Wolffaden-Technik“ wurde dementsprechend die Aufgabe der rechnerischen Simulation darauf reduziert, vergleichbare Stromlinienbilder zu erstellen. Insbesondere sollte dabei untersucht werden, ob das Simulationsmodell in der Lage ist, die Auswirkungen der Formänderungen auf den Verlauf der Strömung um den betrachteten Schiffskörper wirklichkeitsnahe darzustellen, um auf diese Weise, ähnlich wie der Modellversuch, Kriterien für eine optimale Formgestaltung zu liefern.

Angewendetes Rechenverfahren

Das CFD-Programm „MOUSE“ stellt eine Gemeinschaftsentwicklung des **Instituts für Verbrennung und Gasdynamik**, des **Instituts für Schiffstechnik und Transportwesen**, beide an der **Gesamthochschule, MERCATOR Universität Duisburg**, und der **Versuchsanstalt für Binnenschiffbau, Duisburg** dar.

Es handelt sich um ein Programmsystem, mit dem sich Strömungsprobleme in zäher und zähigkeitsfreier Strömung unter Einbeziehung der Bedingung einer freien Oberfläche (Problem des schwimmenden Schiffes) finit berechnen lassen.

Die wichtigsten Merkmale des zugrunde liegenden Verfahrens sind:

- 1) Finite-Volumen-Löser auf der Basis unstrukturierter Gitter
- 2) Kopplung von Kontinuitäts- und Impulserhaltungsgleichungen anhand der Methode der künstlichen Kompressibilität
- 3) Zeitintegration mittels eines expliziten Rung-Kutta Mehrschrittschemas
- 4) Behandlung der freien Oberfläche mit Hilfe der Level-Set Formulierung

Berechnung

Um den Berechnungsaufwand in Grenzen zu halten, wurde die Simulation auf der Basis des Lösungsansatzes für die „Euler-Gleichungen“ durchgeführt, d.h., der Einfluß der Zähigkeit wurde vernachlässigt. Ansonsten beinhaltet das Lösungsmodell die Bedingung der freien Oberfläche, wobei außerdem die idealisierte Flüssigkeit wie das natürliche Medium als nicht drehungsfrei betrachtet wird.

Für die Vergleichsbetrachtung wurden zwei Formvarianten des Kanalschiffes ausgewählt, nämlich die Formvariante 6 (Anl. 11 unten) als Ergebnis der Optimierung und die Formvariante 3 (Anl. 9 unten) als zugehörige Ausgangsvariante (s.a. Abschn. 8.2).

Für beide Varianten wurden entsprechende Gittermodelle generiert, wobei die Möglichkeit, unstrukturierte Zellformationen zu verwenden, den Zeitaufwand erheblich verkürzte.

Ergebnisse

Die Anlagen 167 bis 169 zeigen die rechnerisch erstellten Stromlinienbilder für die Ausgangsvariante des Kanalschiffes (Formvariante 3). Die dargestellten Linien kennzeichnen die Projektion einer räumlichen „Stromlinienfläche“, deren Eintrittspunkte im Bereich der ungestörten Strömung in einem Abstand von 32 mm (Modellmaß) normal zur Kontur einer gedachten Hauptspantprojektion angeordnet worden sind. Die dem Schiffsboden und der Seitenrumpf-Innenwand zugeordneten Stromfäden sind farblich unterschiedlich gekennzeichnet, um den 3-D-Charakter der Darstellung hervorzuheben. Auf diese Weise ist die im Versuch verwendete „Wolffaden-Klebung“ verteilt auf Mittel- und Seitenrumpfboden auch in der Simulation leicht zu identifizieren.

In Anl. 169 ist das Hinterschiff noch einmal vergrößert dargestellt, wobei zusätzlich die Druckverteilung auf der Außenhaut wiedergegeben ist. In allen drei Abbildungen sind die zugehörigen Original-Unterwasseraufnahmen (Anl. 30) ebenfalls dargestellt, wodurch die Realitätstreue der simulierten Bilder unmittelbar erkennbar wird. Als besonders interessantes Detail zeigt das schräg nach innen überströmte Hinterschiff des Seitenrumpfes im Endbereich der inneren Kimm eine Zone erhöhten Unterdrucks (Anl. 169), was bezogen auf das idealisierte Strömungsmodell als Ausdruck von Ablösung gewertet werden kann. Allerdings ist die Auflösung des verwendeten Volumengitters noch zu gering, um die erwartete Wirbelbildung in den dargestellten Stromfäden zum Ausdruck zu bringen.

In der gleichen Weise wie oben sind in den Anlagen 170 bis 172 die Ergebnisse der optimierten Schiffsform (Formvariante 6) wiedergegeben. Auch hier zeigt sich anhand der gegenübergestellten Original-Unterwasseraufnahmen (Anl. 44) eine ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen rechnerischer Simulation und Versuch. Besonders hervorzuheben ist die hier weitgehend achsenparallele Ausbildung der

Strömung entlang des SR-Bodens, verursacht durch die asymmetrische Bauweise. Sie bewirkt, daß die vorher beobachtete Zone erhöhten Unterdrucks am Heck des Seitenrumpfes nicht mehr in Erscheinung tritt (Anl. 172).


Die positiven Ergebnisse geben Anlaß zu der berechtigten Hoffnung, daß Euler-Rechnungen der vorliegenden Art in Zukunft für ähnliche Formoptimierungsaufgaben verstärkt eingesetzt werden können. Insbesondere wären entsprechende Vorentwurfsstudien ein geeignetes Hilfsmittel, um den Versuchsaufwand zu reduzieren und zu rationalisieren.

Dieses Vorhaben wurde in dankenswerter Weise von der Arbeitsgemeinschaft der industriellen Forschungsvereinigungen (AiF) mit Mitteln des BMWi gefördert.

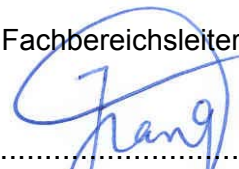
Duisburg, 11.06.2003
Dr.Grs/vMa

Fachbereich Schiffshydrodynamik

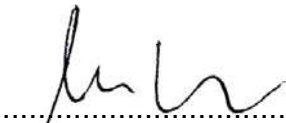
Der Bearbeiter:


.....
(Dr.-Ing. W. Grollius)

Der Fachbereichsleiter:


.....
(Dr.-Ing. T. Jiang)

VBD - Europäisches Entwicklungszentrum
für Binnen- und Küstenschifffahrt


.....
(Prof. Dr. P. Engelkamp)

13. Symbolverzeichnis

A_0	Propellerdiskfläche
A_E	Propellerfläche (abgewickelt u. gestreckt)
b	Fahrwasserbreite, allgemein
B	Schiffsbreite
b_c	Kanalbreite
C	Beiwert der Oberflächenverformung
C_p	Beiwert des Flüssigkeitsdrucks
C_A	Außenhautzuschlag zum Reibungsbeiwert
C_B	Völligkeitsgrad
C_f	Reibungsbeiwert
C_{Th}	Schubbelastungsgrad
C_{PD}	Propeller-Flächenbelastung
D	Propellerdurchmesser
F_{geom}	Formeinflußfunktion (spezifische Leistung)
F_n	Froudezahl
F_{nh}	Froudesche Tiefenzahl
g	Gravitationskonstante
h	Wassertiefe
h_c	Wassertiefe im Kanal
h_{MR}	Höhe des Mittelrumpfbodens über Basis
J	Fortschrittsziffer
K_T	Schubbeiwert
K_Q	Momentenbeiwert
K_{QF}	Momentenbeiwert aus Freifahrtversuch
L	Länge allgemein, Schiffslänge
L_{OA}	Länge über Alles
m	Maßstabseffekt (gesamt)
m_D	Düsenmaßstabseffekt
m_P	Propellermaßstabseffekt
n	Propellerdrehzahl
P	Propellersteigung
p_0	ungestörter Druck
p_a	Atmosphärischer Druck
P_D	Wellenleistung
P_E	Schleppleistung
p_S	Ideeller Staudruck
R_A	Reibungsabzug
R_n	Reynoldszahl des Schiffes
R_{nP}	Reynoldszahl des Propellers
R_T	Gesamtwiderstand
S	Benetzte Oberfläche
T	Schiffstiefgang
T	Propellerschub
t	Sogziffer
T_{BM}	Tiefgang der MR-Bugplatte auf Mitte Schiff
T_{BS}	Tiefgang der MR-Bugplatte auf Seite Mittelrumpf
T_{SM}	Tiefgang des MR-Spiegels auf Mitte Schiff
T_{SS}	Tiefgang des MR-Spiegels auf Seite Mittelrumpf
u_0	Anströmgeschwindigkeit, Transportgeschwindigkeit (Strömung)
V	Schiffsgeschwindigkeit

V_A	Propelleranströmgeschwindigkeit
Vol	Verdrängung
w	Nachstromziffer (allgemein)
w_T	Nachstromziffer aus K_T -Identität
X, Y, Z	Schiffsfestes Koordinatensystem
Z_v	Absenkung des fahrenden Schiffes
κ	Kelvin-Winkel
ν_G	Winkel der Gillung am Vorschiff (hier: Mittelrumpf)
p	Druckdifferenz (gemessen)
Z	Druckhöhenverlust in zäher Strömung
	Gleitzahl, spezifische Schleppleistung
D	Spezifische Wellenleistung
	Oberflächenverformung, allgemein
M	Maximale Tiefe der Mittschiffsmulde (Wellenlängsschnitt)
W	Doppelamplitude einer Oberflächenwelle (Wellenlängsschnitt)
B	Propellerwirkungsgrad (hinter dem Schiff)
D	Gesamtgütegrad
H	Schiffseinflußgrad
R	Gütegrad der Anordnung
o	Propellerwirkungsgrad (Freifahrt)
	Trimmwinkel
	Maßstabszahl
	Dimensionslose Längenkoordinate
	Dichte des Wassers
	Potentialfunktion (allgemein)
s	Störpotential, Körperpotential
	Stromfunktion
	Gradient

Abkürzungen und Indizes:

Hochindex " ' " = Modellgröße

MR = Mittelrumpf

SR = Seitenrumpf

14. Literaturverzeichnis

Eggers, K., (1955): *Über Widerstandsverhältnisse von Zweikörperschiffen.* Jahrbuch der STG Nr. 49

Sturzel, W., Helm, K., Schäle, E., (1959): *Versuche mit ummantelten Schraubenpropellern zur Ermittlung der Maßstabskennzahl.* Forschungsbericht des Landes NRW Nr. 815

Vollheim, R., (1968): *Über Formgebung und Widerstand von Katamaranen.* Schiffbauforschung, Heft 5/6

Vollheim, R., (1968): *Untersuchungen zur Formgebung von Katamaranen.* Schiffbautechnik, Heft 8

Corlett, E.C.B., (1969): *Twin Hull Ships.* The Royal Institution of Naval Architects

Heuser, H., (1974): *Systematische Modelluntersuchung von Zweirumpf-Binnenschiffen.* 154. Mitteilung der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Duisburg

N., N., (1982): *RO-RO-Verkehr auf der Donau.* Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, Heft 8

N., N., (1982): *"HAN TERVEL" in Fahrt. Zweiter RO/RO-Semi-Katamaran auf der Donau.* Binnenschiffahrtsnachrichten, Heft 30

Jensen, G., (1988): *Berechnung der stationären Potentialströmung um ein Schiff unter Berücksichtigung der nichtlinearen Randbedingung an der Wasseroberfläche.* Institut für Schiffbau, Universität Hamburg, Bericht Nr. 484

Grollius, W., Heuser, H., (1992): *Der Semi-Katamaran – ein modernes Fahrzeugkonzept für den Containertransport auf Binnenwasserstraßen.* Binnenschiffahrt Nr. 10

Broß, H., (1991): *Vergleichende fahrdynamische Modellversuche im Rechteck- und Trapezprofil bei Begegnungen und Einzelfahrten.* VBD-Bericht Nr. 1309

Grollius, W., (1996): *Untersuchung der Propulsion und der Verkehrssicherheit von Binnenschiffen in Kanälen und Flüssen - Teil 1: Propulsions- und Stoppversuche.* VBD-Bericht Nr. 1425

PLANCO, (1999): *Prognose des kombinierten Ladungsverkehrs der Binnenschiffahrt bis zum Jahr 2010.* Essen

Semikatamaran, Kanalschiff

Kurzbeschreibung und Hauptdaten der untersuchten Formvarianten

Kurzbeschreibung der Formvarianten

Form- variante	Seitenrumpf		Mittelrumpf	
	B _{SH} [m]	Bug	Bug	Heck
1	2,85	V-Spt., symmetrisch	V-Spt., symmetrisch	Ponton, S-förmige Gilling
1A	2,85	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 1, um Δ L = 3,0 m nach vorne eingez.
2	3,68	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 1
3	2,85	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 2	Wie Formvar. 1
4	2,85	asymm., innen gerade	Wie Formvar. 2	Wie Formvar. 1
5	2,85	Wie Formvar. 4	Wie Formvar. 2	Wie Formvar. 1
6	2,85	Wie Formvar. 4	Wie Formvar. 2	Wie Formvar. 1

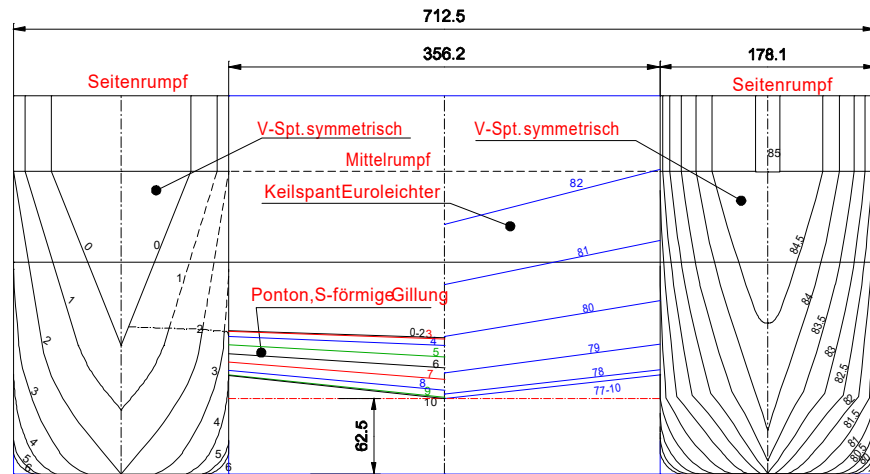
Hauptdaten der Formvarianten

Form- variante	L _{OA} [m]	L _{OA,MR} [m]	B [m]	B _{SR} [m]	B _{MR} [m]	h _{MR} [m]	T [m]	L _{VL} [m]	L _{VL,MR} [m]	Vol [m³]	S [m²]
1	85,00	82,00	11,40	2,85	5,70	0,500	2,800	84,701	82,000	2193,0	1486,8
1A		79,00	11,40	2,85	5,70	1,000		84,701	81,386	2014,0	1584,1
2	85,00	82,00	11,40	3,68	4,04	1,500	2,800	84,613	80,725	1801,0	1654,3
3	85,00	82,00	11,40	2,85	5,70	0,500	2,800	84,701	79,000	2193,0	1486,8
4	85,00	82,00	11,40	2,85	5,70	0,500	2,800	84,613	82,000	2269,6	1518,3
5	85,00	82,00	11,40	2,85	5,70	1,000	2,800	84,613	81,712	2135,7	1580,3
SA	85,00	82,00	11,40	2,85	5,70	1,500	2,800	84,613	78,592	2004,6	1644,8
6	85,00	82,00	11,40	2,85	5,70	>2,8	2,800	84,613	0,000	1643,3	1633,8
						0,500	2,800	84,701	82,000	2141,8	1532,9
						1,000	2,800	84,701	81,712	1954,6	1607,9
						1,500	2,800	84,701	78,592	1769,5	1672,4
						>2,8	2,800	84,701	0,000	1285,3	1343,0
						1,000	2,800	84,701	82,000	1927,6	1599,2
						1,000	2,800	84,701	82,000	1911,6	1603,1
						1,000	2,800	84,701	82,000	1911,6	1579,5
						1,000	2,800	84,698	82,000	1881,3	1587,2

Hauptdaten der Formvariante 6 - Tiefgangsvariation (Serienversuche) -

Form- variante	L _{OA} [m]	L _{OA,MR} [m]	B [m]	B _{SR} [m]	B _{MR} [m]	h _{MR} [m]	T [m]	L _{VL} [m]	L _{VL,MR} [m]	Vol [m³]	S [m²]
6	60,00	57,00	11,40	2,85	5,70	1,000	2,800	59,701	57,000	1248,9	1104,9
6	85,00	82,00	11,40	2,85	5,70	1,000	2,000	59,510	51,016	756,1	968,2
6	110,00	107,00	11,40	2,85	5,70	1,000	2,800	84,698	82,000	1881,3	1587,2
						1,000	2,400	84,600	81,872	1515,5	1496,1
						1,000	2,000	84,496	76,016	1160,8	1370,1
						1,000	2,800	109,701	107,000	2513,7	2069,5
						1,000	2,000	109,510	101,016	1565,5	1772,0

Semikatamaran , Kanalschiff Formvariante 1



Model M1677 B1 - L1 Basis 62.5 mm

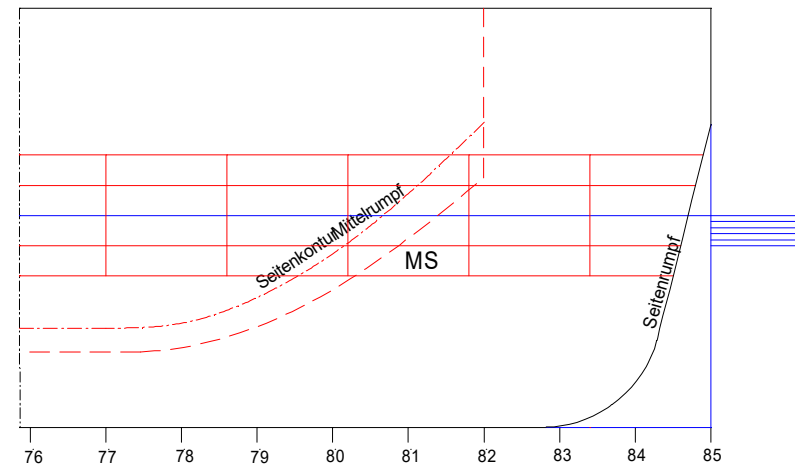
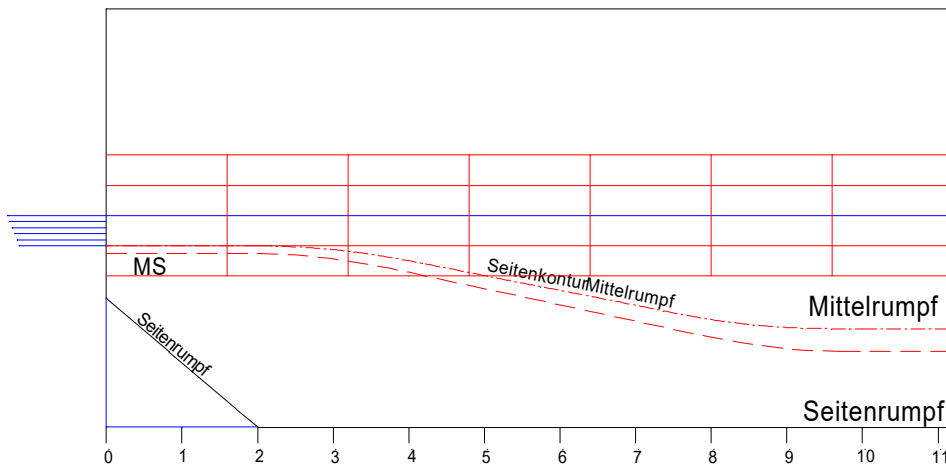
Scale 1 : 16

Länge Seitenrumpf = 5312.5 mm

Länge Mittelrumpf = 5125.0 mm

Breite a. Spt. = 712.5 mm

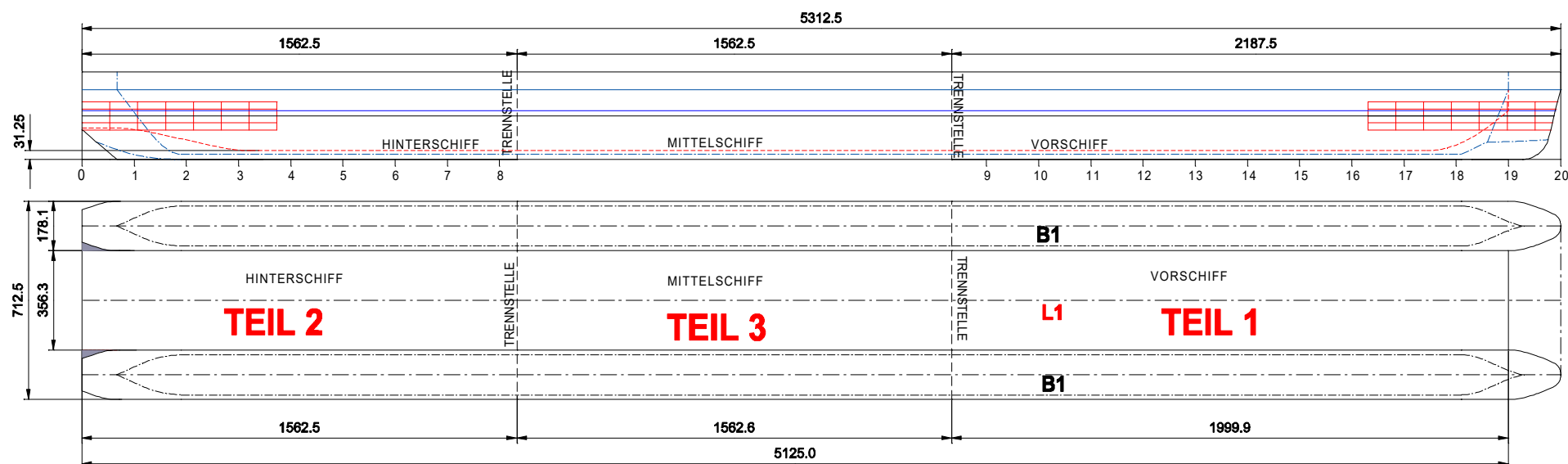
Bauspantabstand = 62.5 mm



Semikatamaran , Kanalschiff

Formvariante 1

SKIZZE : WL - ANRISSPLANFÜR M1677B1 + L1



Turbulenzerzeuger
 Art: Sandstreifen
 Lage: Spt. 17 und 19

WL-Abst. = 4 x 25.0 mm
 Fotonetz = 7 x 100 mm

Model M1677 B1 - L1 Basis 62.5 mm

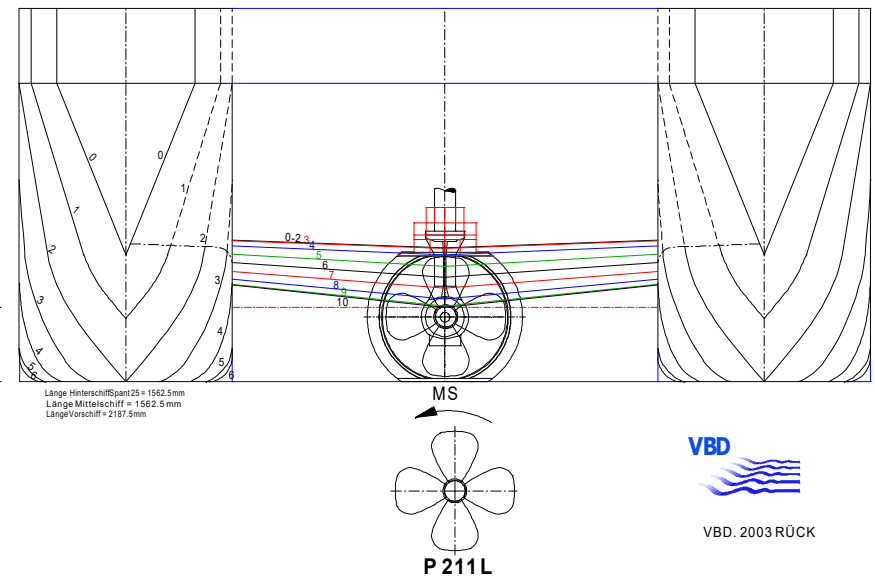
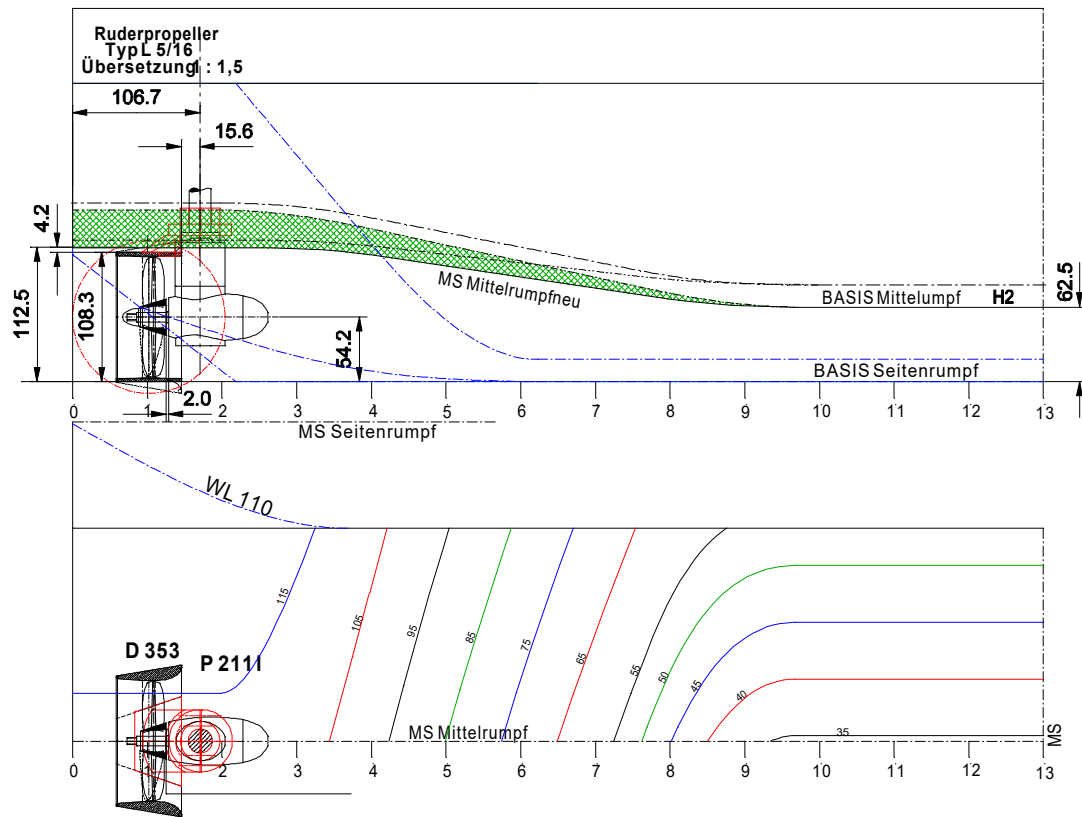
Scale 1 : 16

Länge Seitenrumpf = 5312.5 mm
 Länge Mittelrumpf = 5125.0 mm
 Breite a. Spt. = 712.5 mm
 Spantabstand = 187.5 mm
 TIEFGANG_k 156.25 mm LWL = 5289.1 mm
 TIEFGANG_{max} 175.0 mm LWL = 5293.8 mm

VBD
 VBD. 2003 RÜCK

Bemerkung: Die Varianten M1677B1 + L2 (verkürzte Variante) bzw. M1677B1 + L3 (verlängerte Variante) wurden durch Entfernen bzw. Hinzufügen von Teil 3 (L3 = 1562.6 mm) erzeugt.

Semikatamaran , Kanalschiff Formvariante 1



Anordnungszeichnung Model M1677 B1 - L1 Basis 62.5 mm

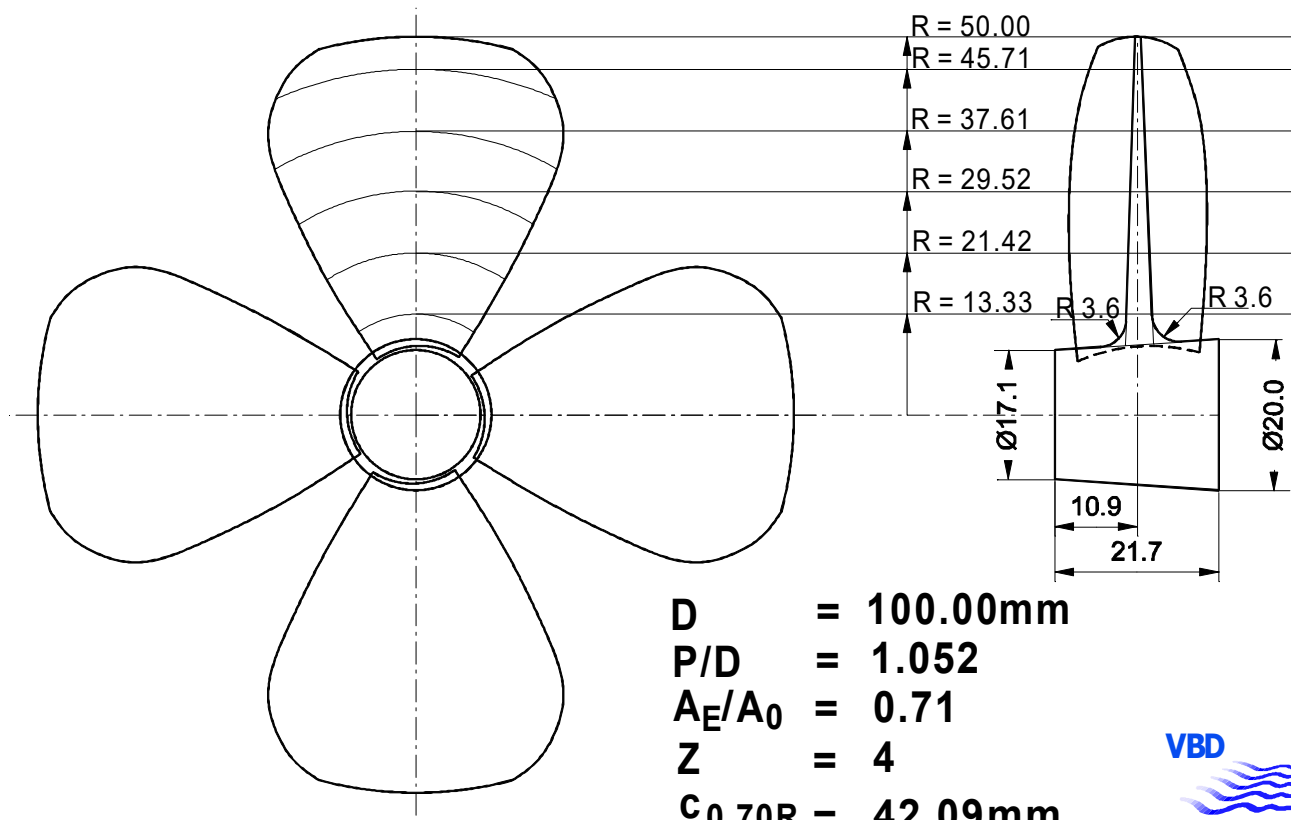
Scale 1 : 16

Länge Seitenrumpf = 5312.5 mm

Länge Mittellumpf = 5125.0 mm

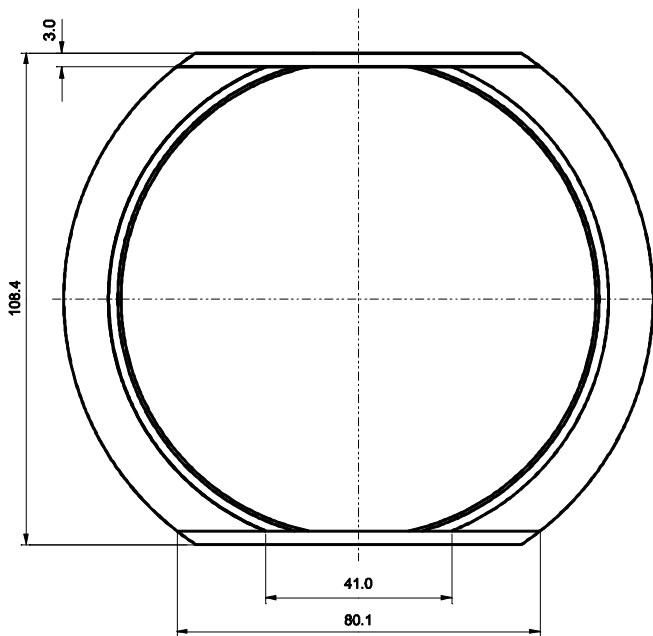
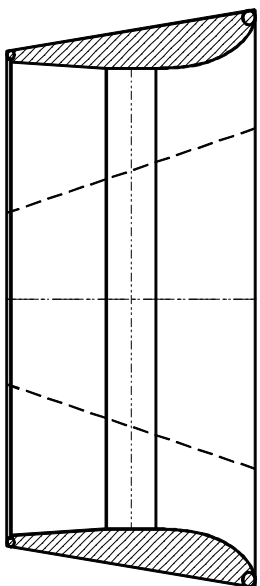
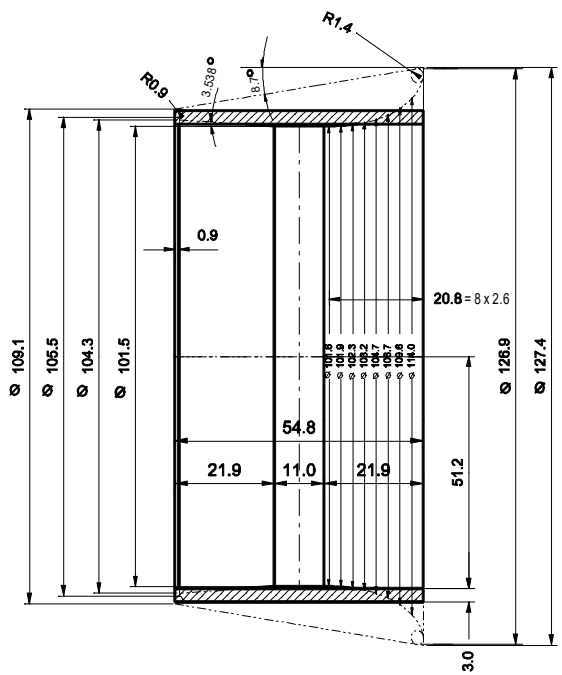
Breite a. Spt. = 712.5 mm

Baupantabstand = 62.5 mm



D = 100.00mm
P/D = 1.052
A_E/A₀ = 0.71
Z = 4
C_{0,70R} = 42.09mm

P 211 r/l

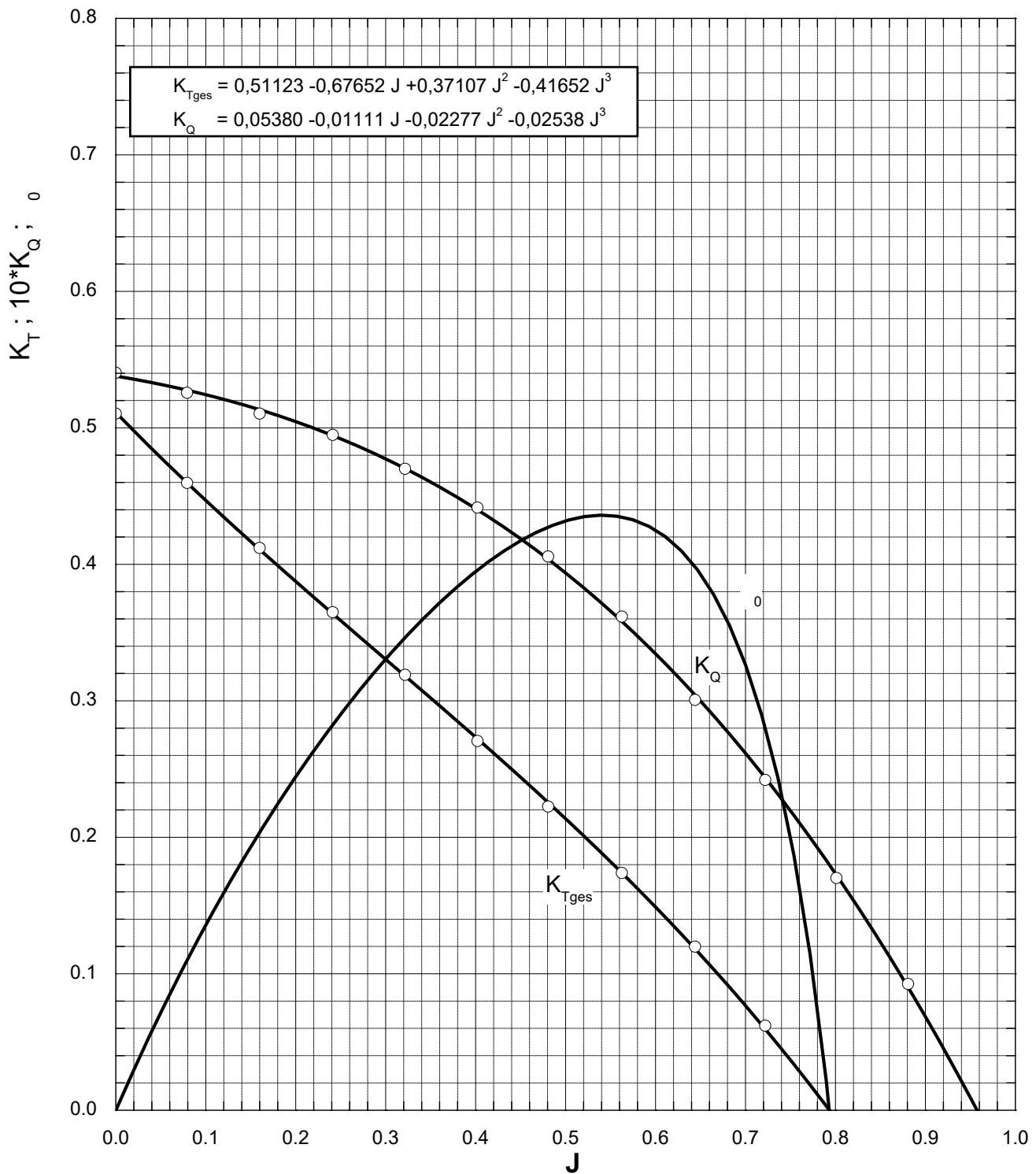


1 DÜSEFÜRM 1677
D 353

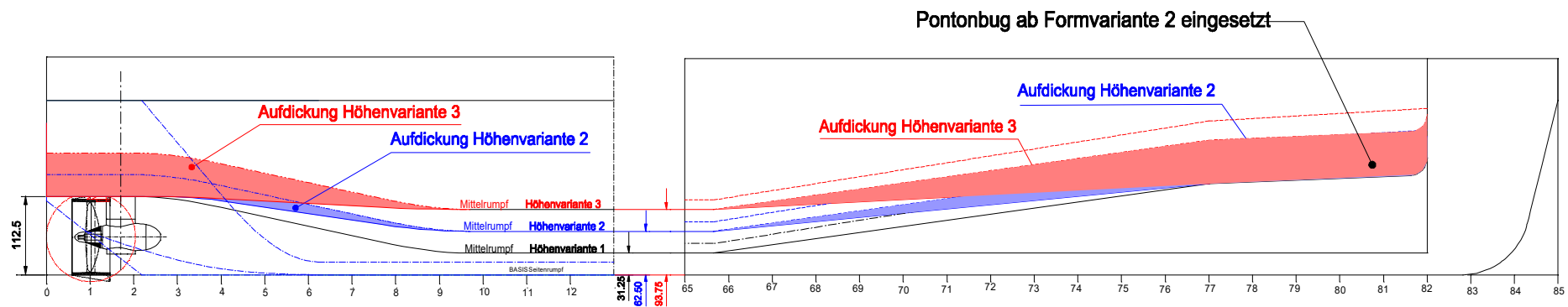


Propeller - Freifahrt

System: Z-Antrieb mit P211L + Düse D353

 $n = 24,91 \text{ 1/s}$ $Rn_p = 2,23 - 2,40 \times 10^5$ **Propeller Nr. 211L** $D = 0,10 \text{ m}$ $P/D = 1,052$ $A_E/A_0 = 0,71$ $Z = 4$ $c_{0,7R} = 0,0421 \text{ m}$

Semikatamaran , Kanalschiff Höhenvarianten Mittelrumpf



Model M1677 B1 - L1 Basis 62.5 mm

Scale 1 : 16

Länge Seitenrumpf = 5312.5 mm

Länge Mittelrumpf = 5125.0 mm

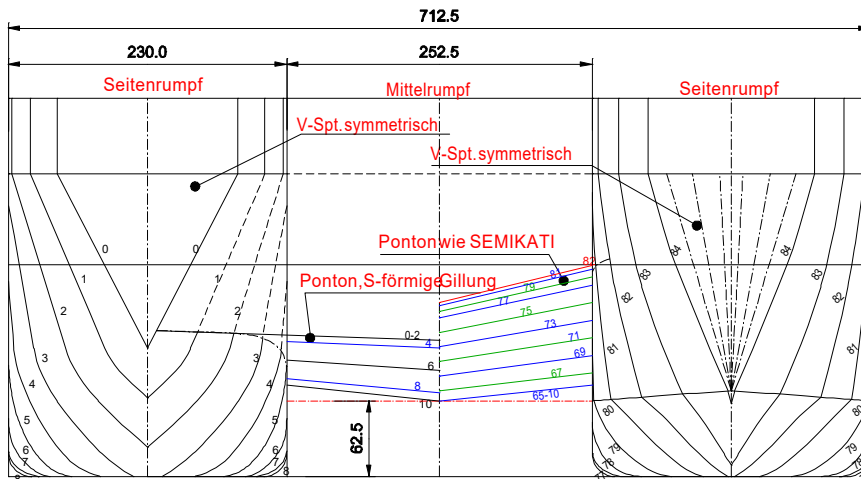
Breite a. Spant = 712.5 mm

Bauspantabstand = 62.5 mm



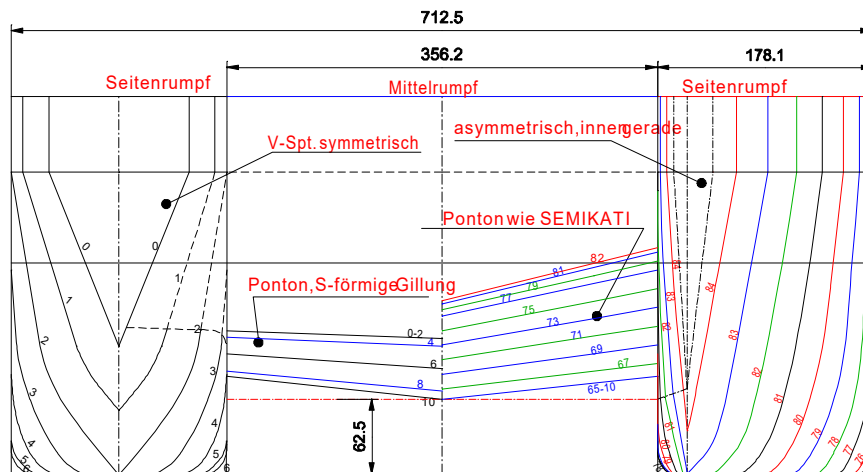
Semikatamaran , Kanalschiff

Formvariante 2



Semikatamaran , Kanalschiff

Formvariante 4



Model M1677 B1 - L1 Basis 62.5 mm

Scale 1 : 16

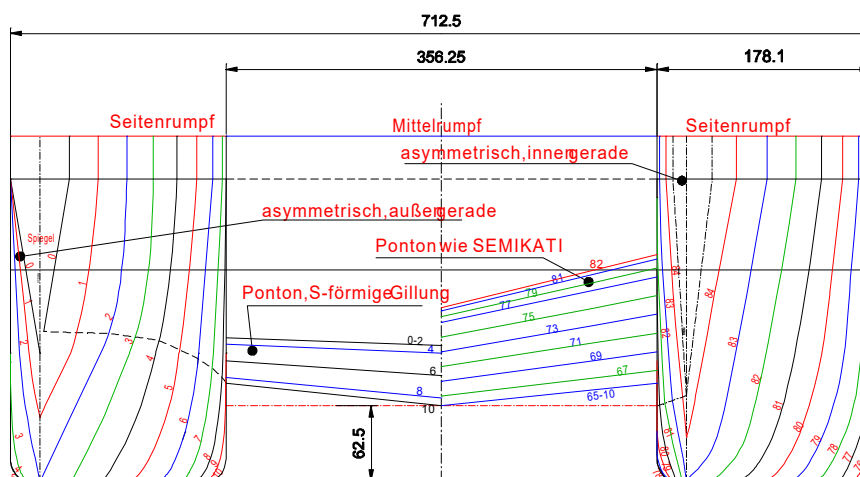
Länge Seitenrumpf = 5312.5 mm

Länge Mittlrumpf = 5125.0 mm

Breite a. Spt. = 712.5 mm

Bauspantabstand = 62.5 mm

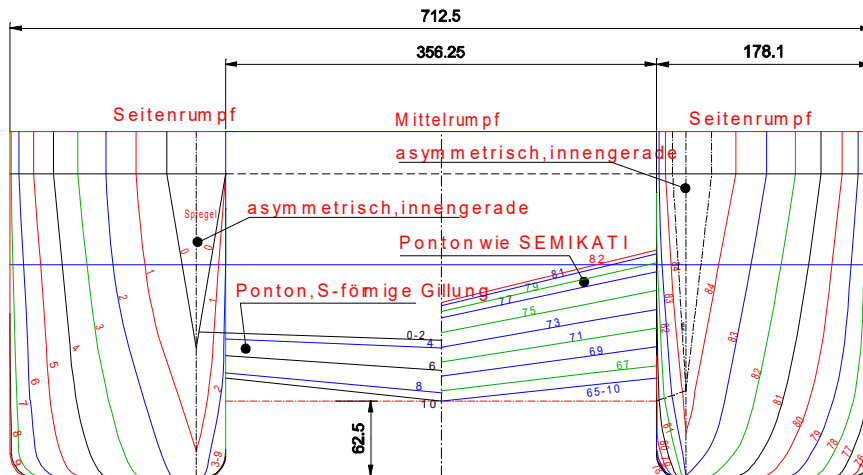
Formvariante 5



VBD. 2002 RÜCK

Semikatamaran , Kanalschiff

Formvariante 5a



Model M1677 B1 - L1 Basis 62.5 mm

Scale 1 : 16

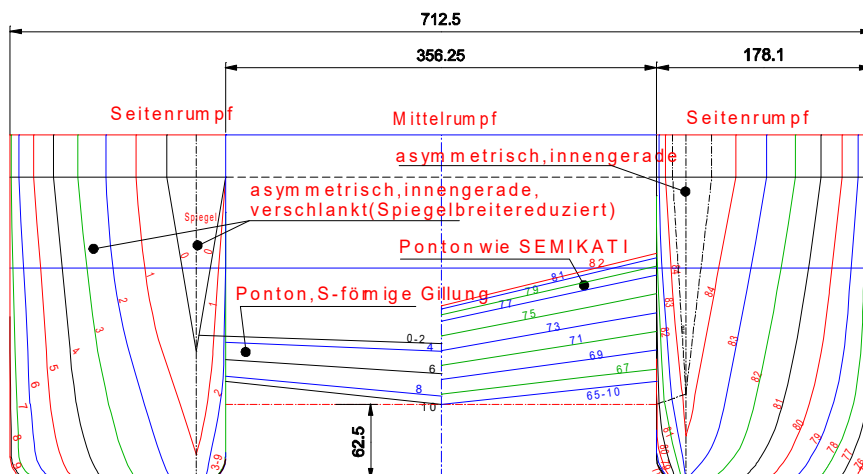
Länge Seitenrumpf = 5312.5 mm

Länge Mittelrumpf = 5125.0 mm

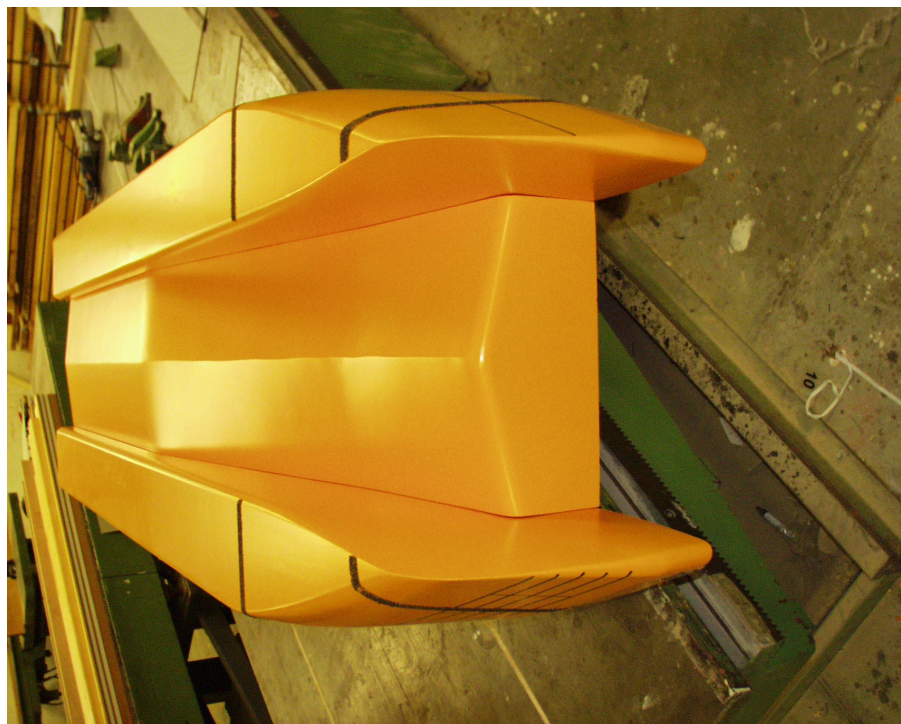
Breite a. Spt. = 712.5 mm

Bauspantabstand = 62.5 mm

Formvariante 6



VBD. 2003 RÜCK



Kanalschiff, Formvariante 6,
Vor- und Hinterschiffssektion,
teilweise ausgerüstet

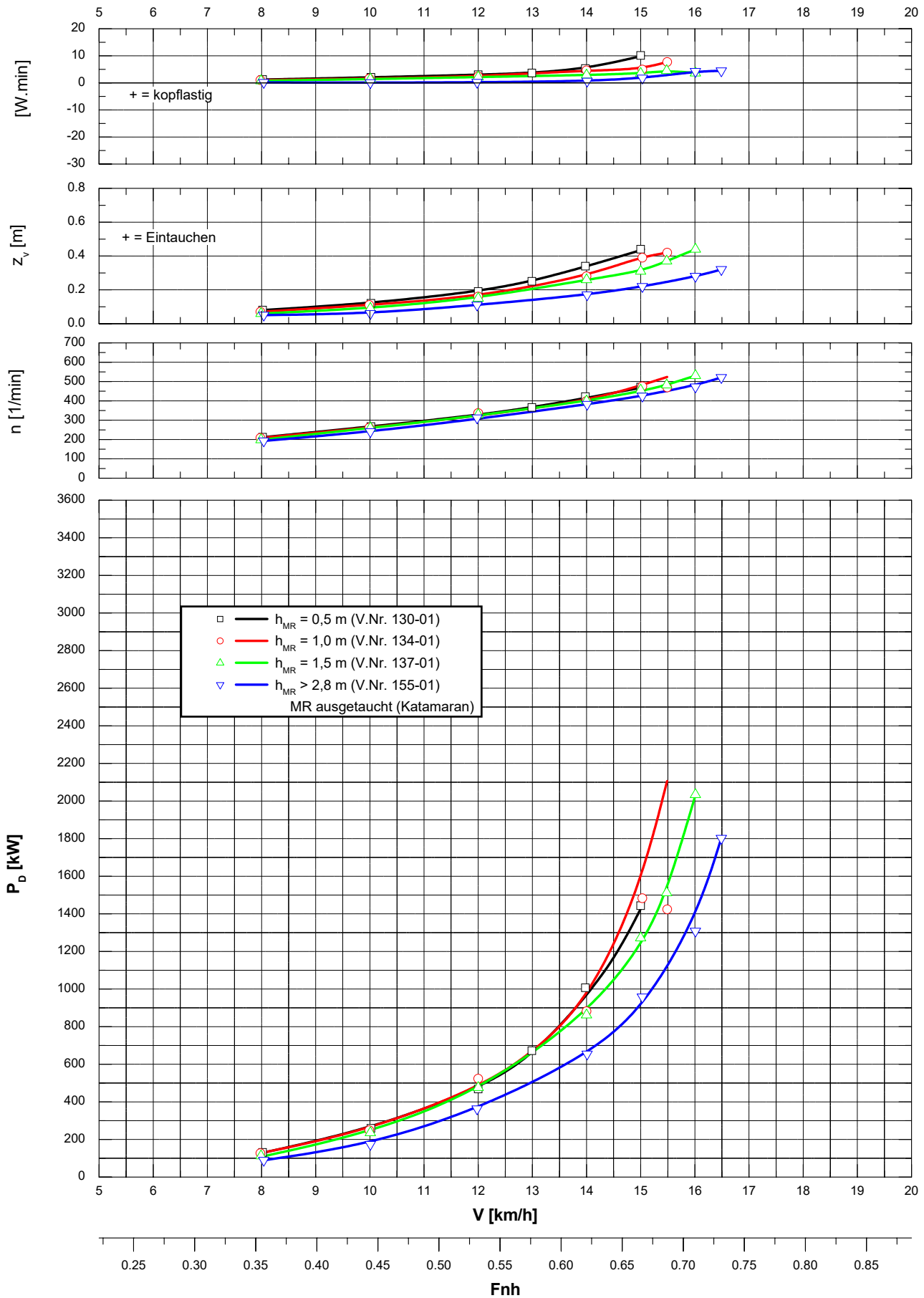
Variation Höhe MR-Boden ü. Basis - Propulsion -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar.1), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $B_{SR} = 2,85 \text{ m}$

MR-Bug: Typ Euro-Leichter

$h = 4,0 \text{ m}$; $T = 2,8 \text{ m}$

seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 1 von 3



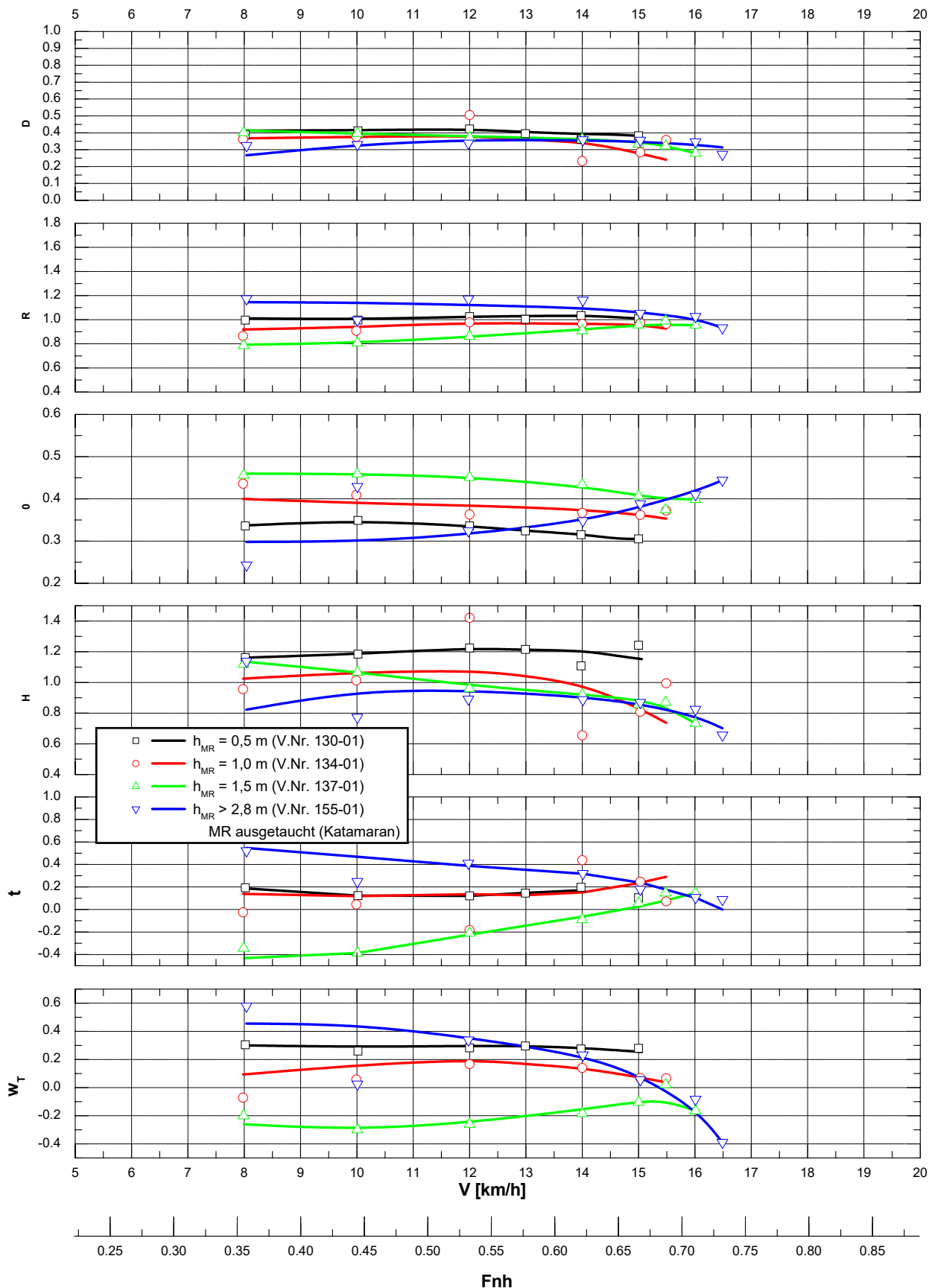
Variation Höhe MR-Boden ü. Basis - Propulsion -
Semikat. (Kanalschiff, Formvar.1), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $B_{SR} = 2,85 \text{ m}$

MR-Bug: Typ Euro-Leichter

$h = 4,0 \text{ m}$; $T = 2,8 \text{ m}$

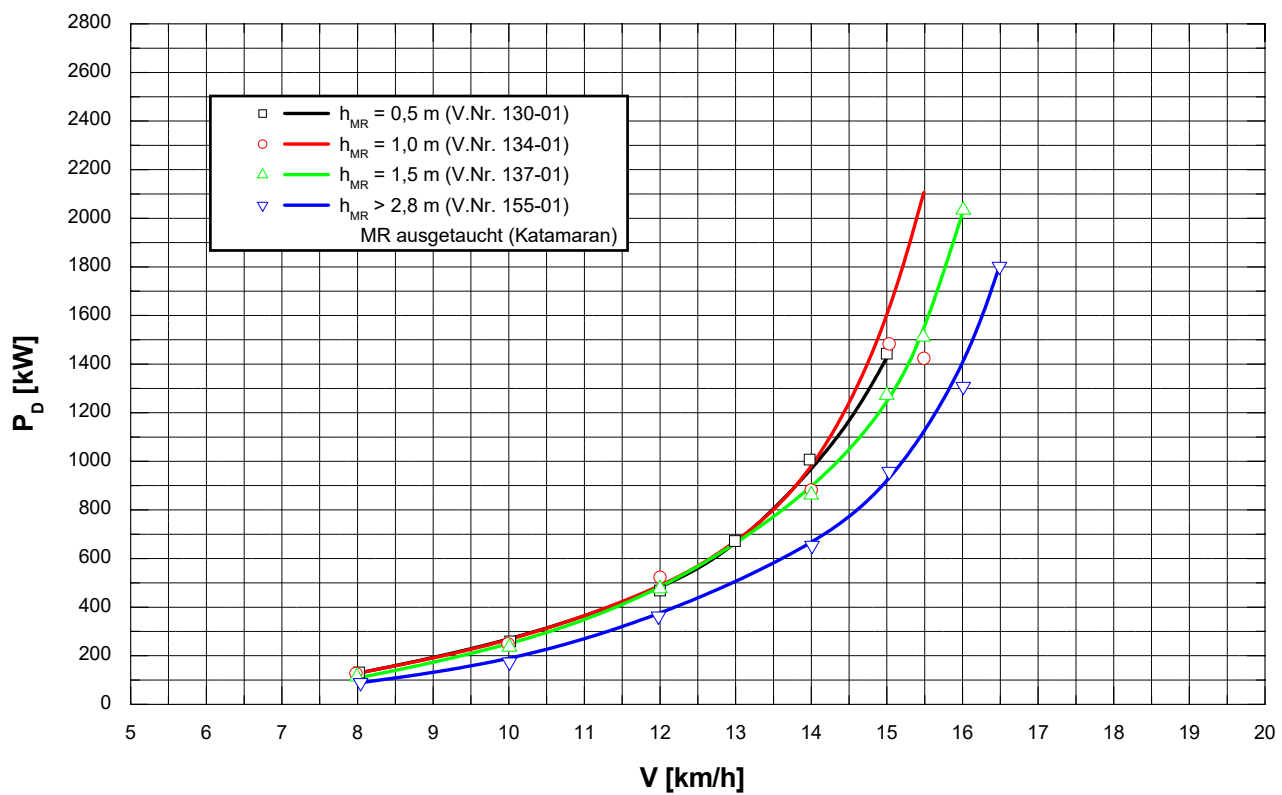
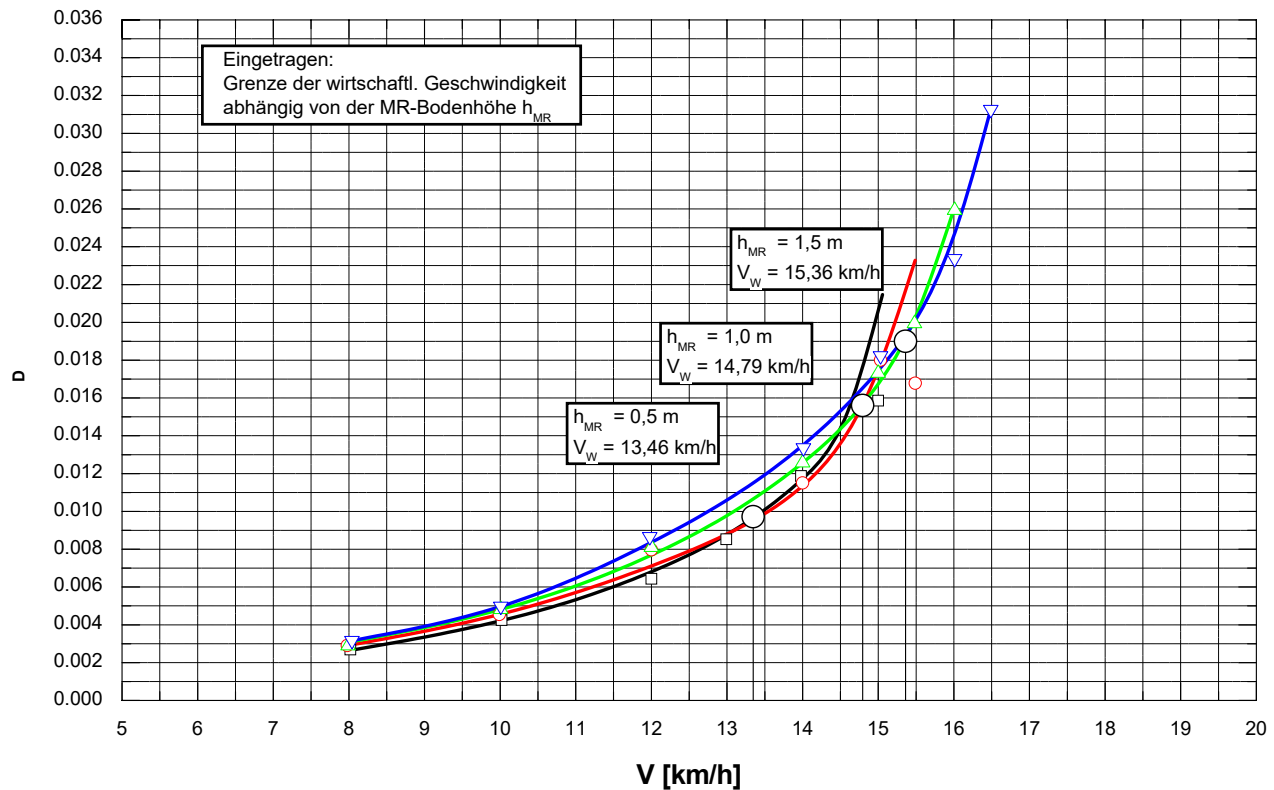
seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 2 von 3

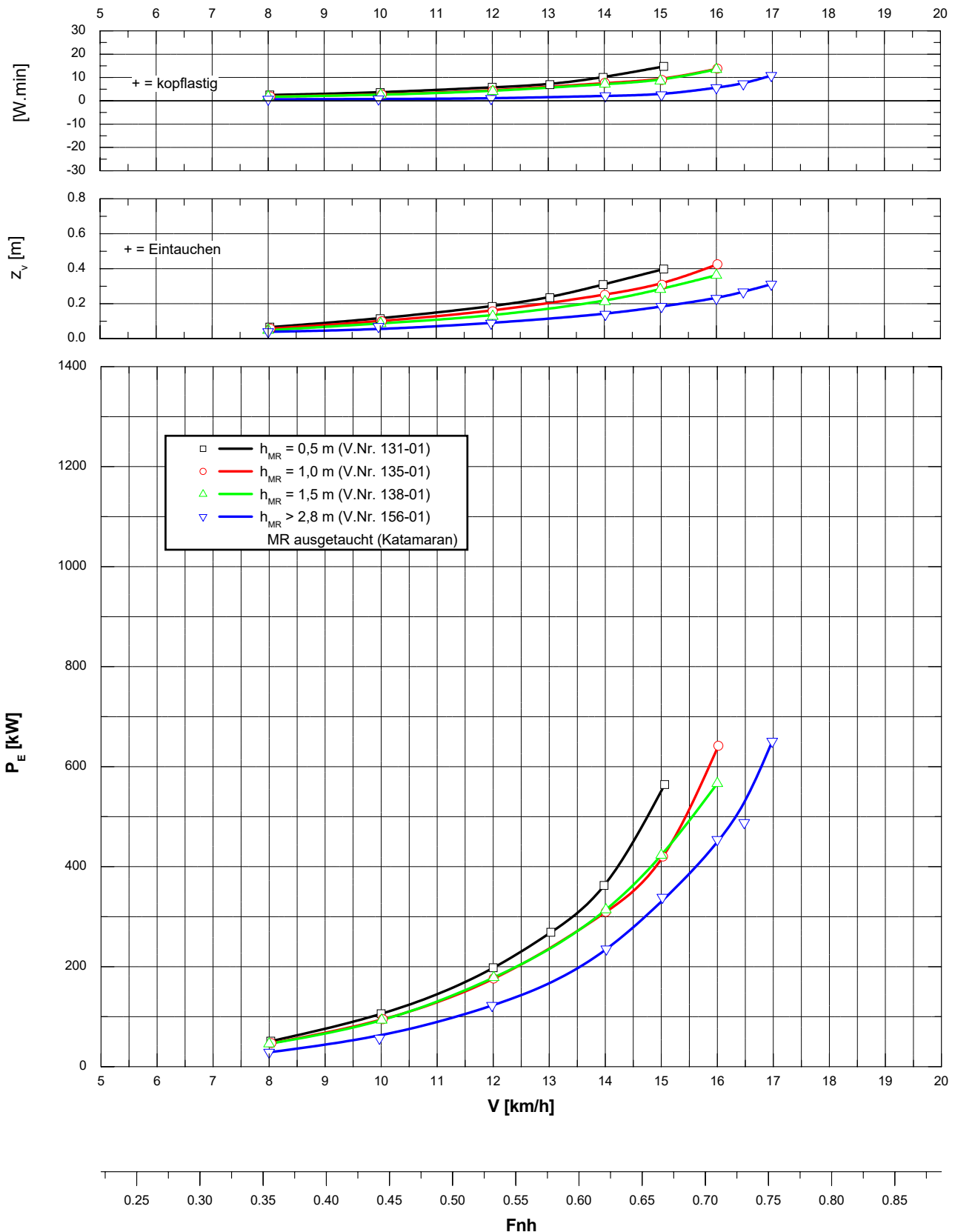


Variation Höhe MR-Boden ü. Basis - Propulsion -
Spezifische Leistung
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar.1), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $B_{SR} = 2,85 \text{ m}$
 MR-Bug: Typ Euro-Leichter
 $h = 4,0 \text{ m}$; $T = 2,8 \text{ m}$
 seitl. unbegr. Fahrwasser

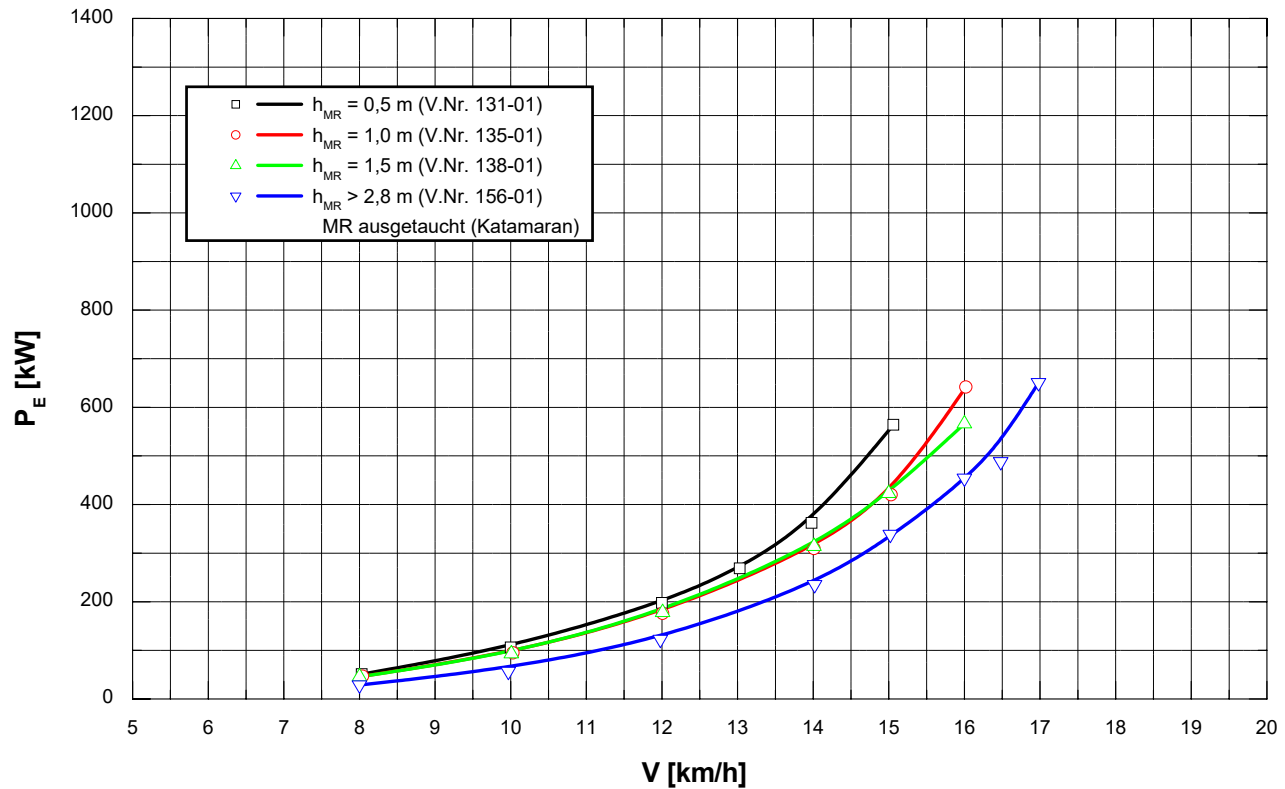
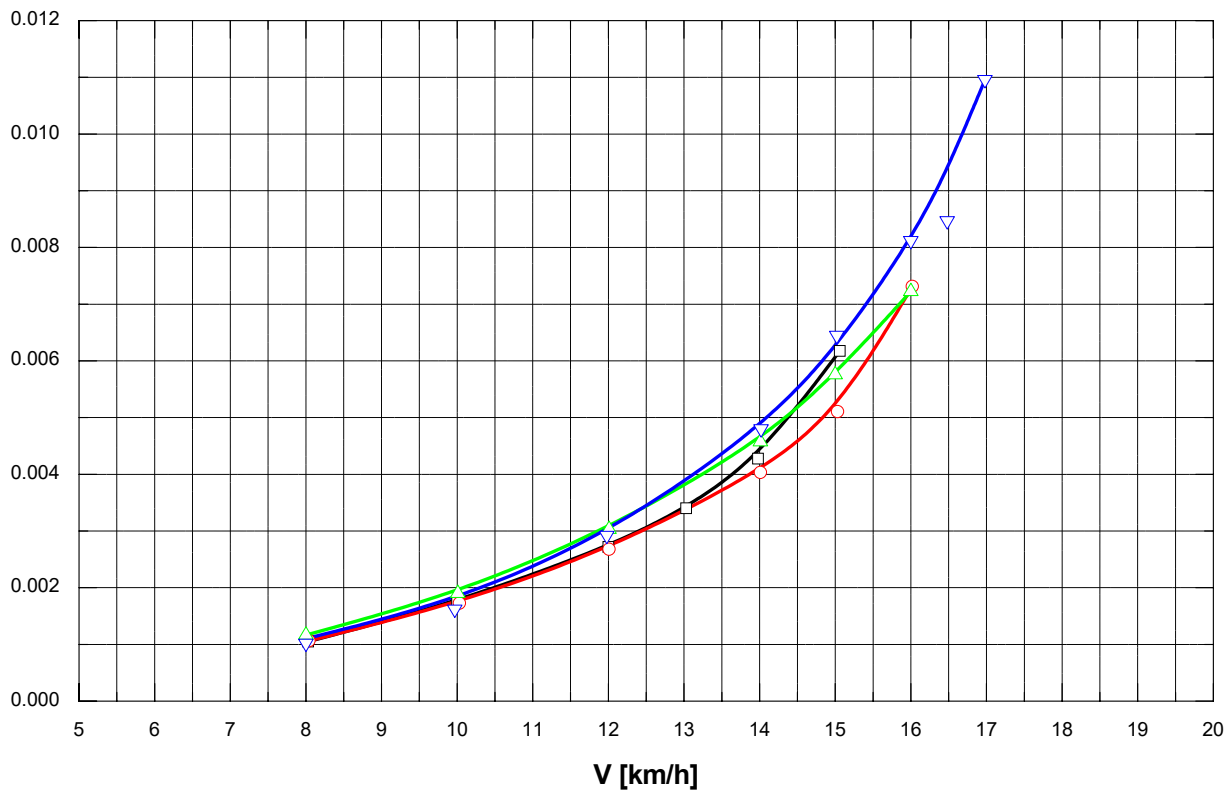
Blatt 3 von 3



Variation Höhe MR-Boden ü. Basis - Widerstand -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar.1), $L_{OA} = 85,0$ m; $B_{SR} = 2,85$ m
 MR-Bug: Typ Euro-Leichter
 $h = 4,0$ m ; $T = 2,8$ m
 seütl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 1 von 2



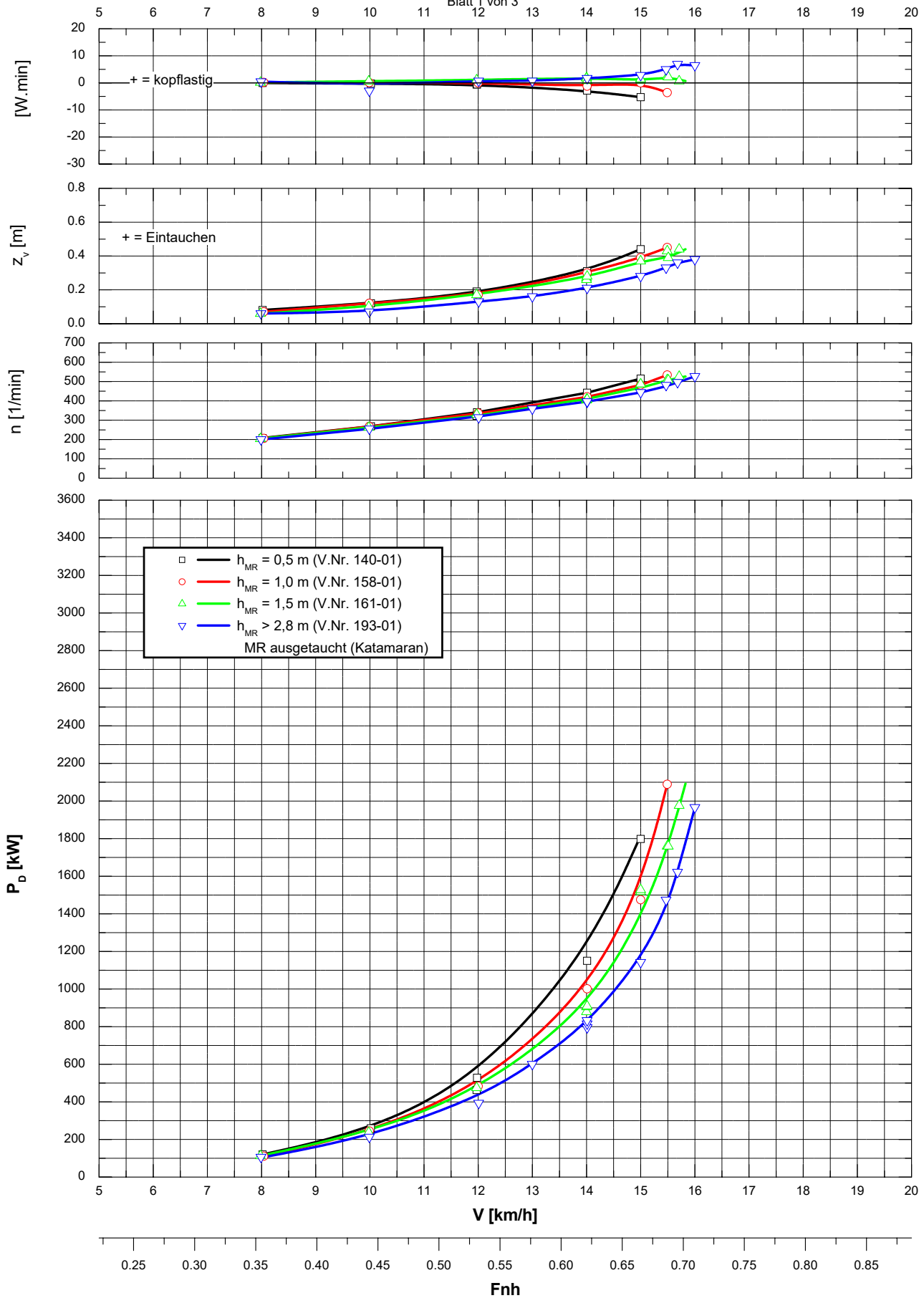
Variation Höhe MR-Boden ü. Basis - Widerstand -
Spezifischer Widerstand
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar.1), $L_{OA} = 85,0$ m; $B_{SR} = 2,85$ m
 MR-Bug: Typ Euro-Leichter
 $h = 4,0$ m ; $T = 2,8$ m
 seitl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 2



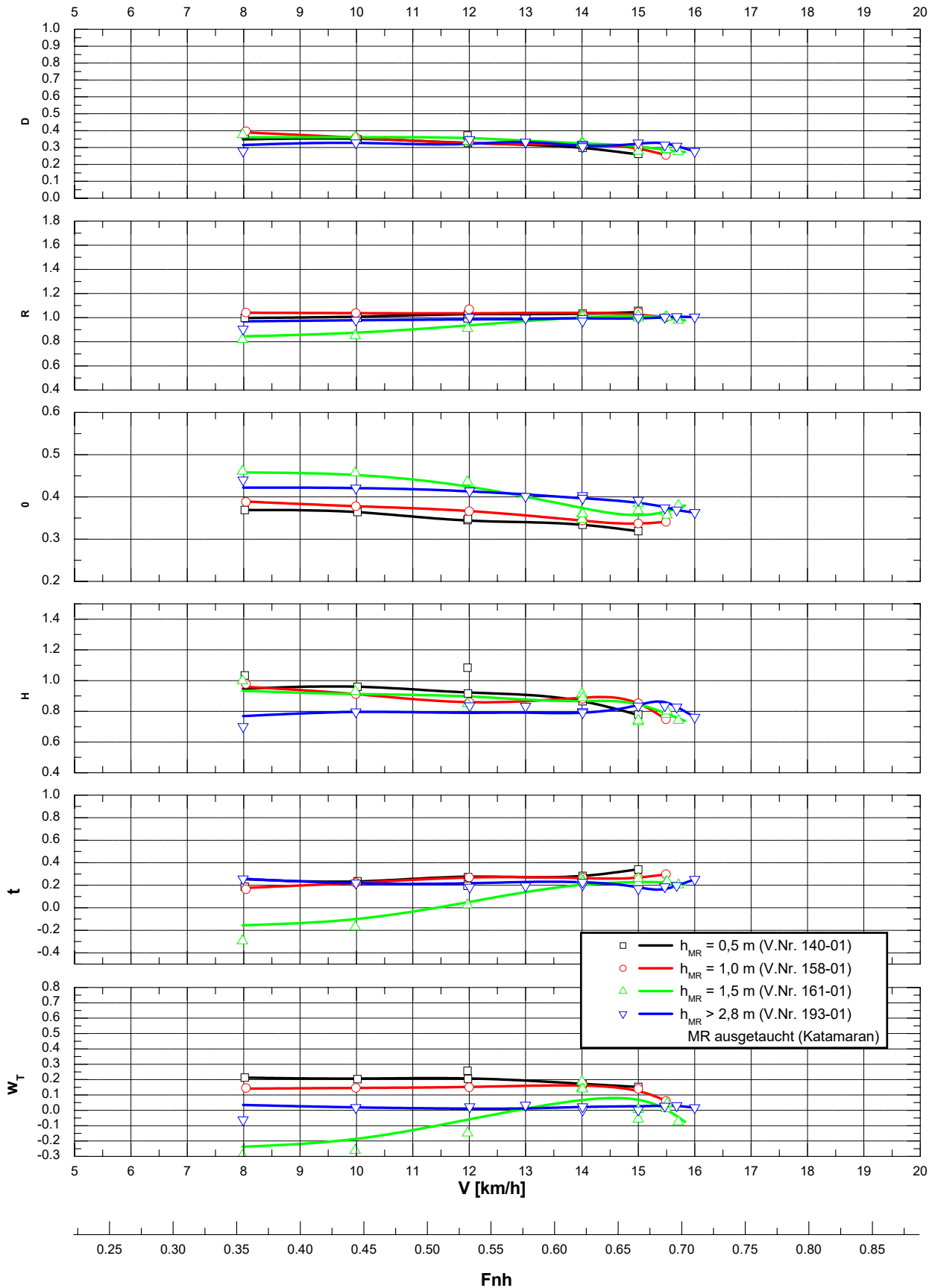
Variation Höhe MR-Boden ü. Basis - Propulsion -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 2), $L_{OA} = 85,0$ m; $B_{SR} = 3,68$ m

MR-Bug: Typ Ponton
 $h = 4,0$ m ; $T = 2,8$ m
 seitl. unbegr. Fahrwasser

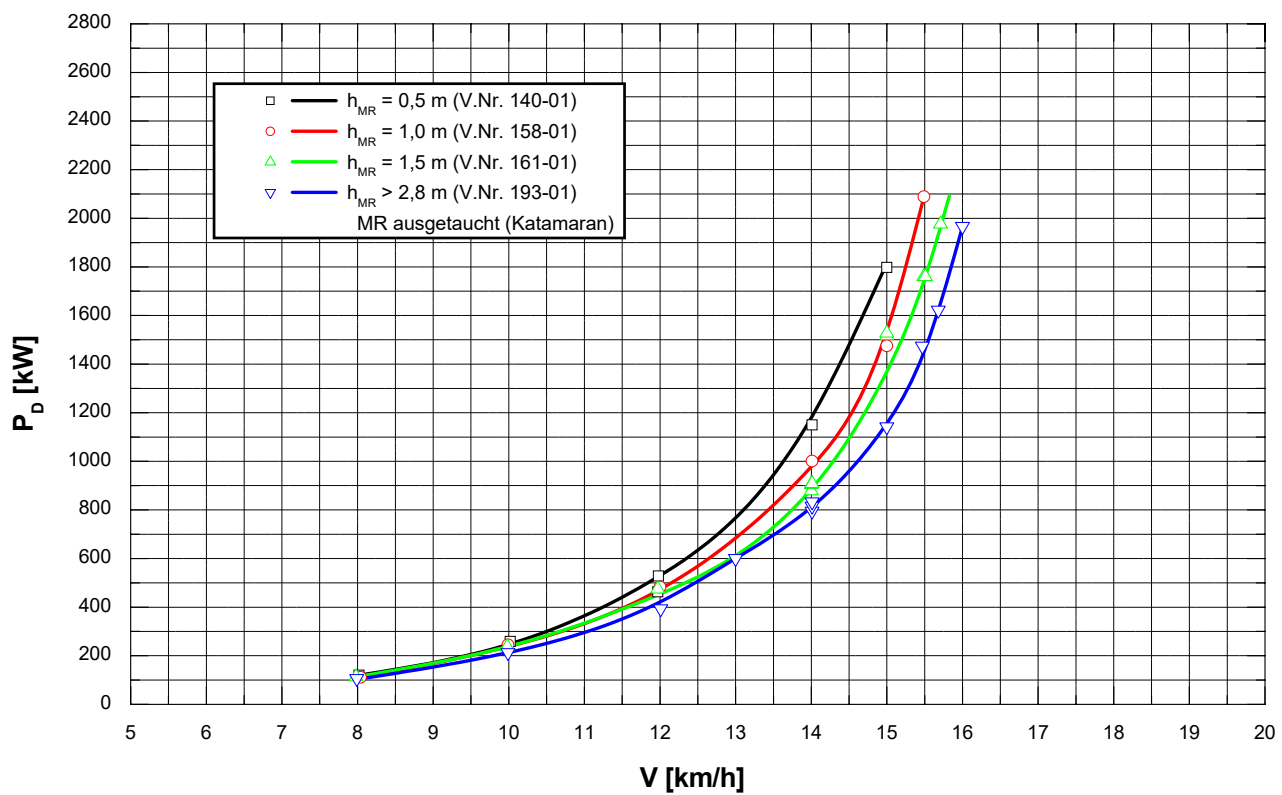
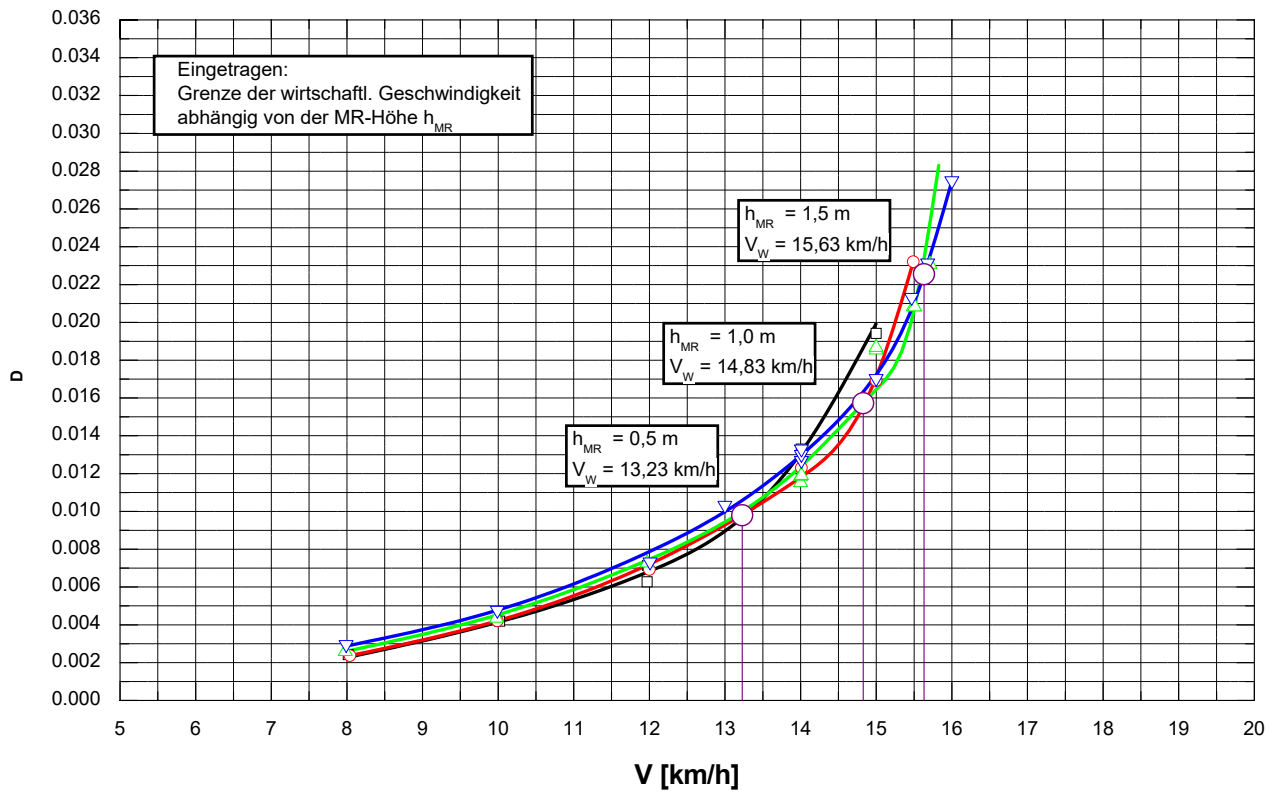
Blatt 1 von 3



Variation Höhe MR-Boden ü. Basis - Propulsion -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 2), $L_{OA} = 85,0$ m; $B_{SR} = 3,68$ m
 MR-Bug: Typ Ponton
 $h = 4,0$ m ; $T = 2,8$ m
 seidl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 3



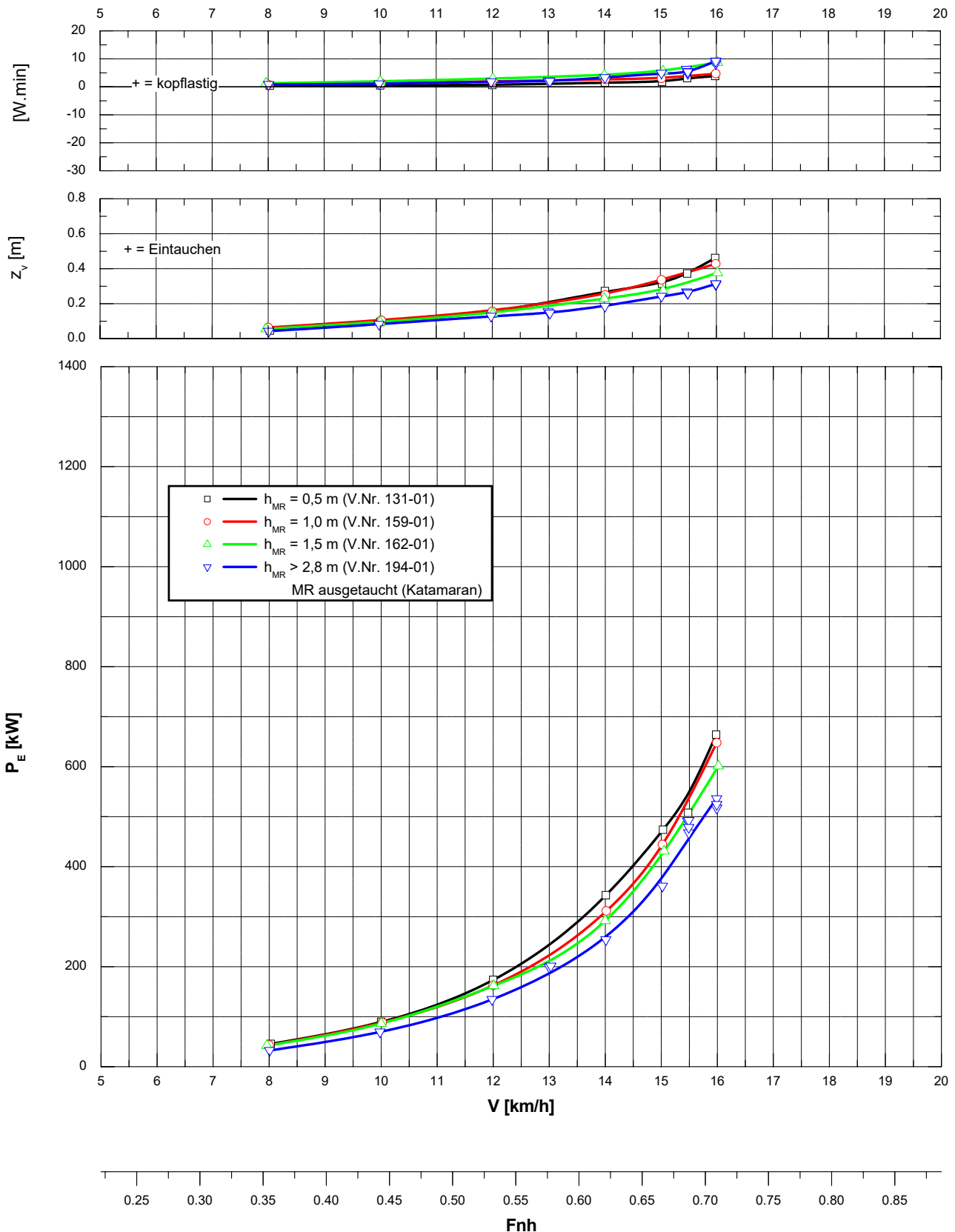
**Variation Höhe MR-Boden ü. Basis - Propulsion -
Spezifische Leistung**
Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 2), $L_{OA} = 85,0$ m; $B_{SR} = 3,68$ m
MR-Bug: Typ Ponton
 $h = 4,0$ m ; $T = 2,8$ m
seitl. unbegr. Fahrwasser
Blatt 3 von 3



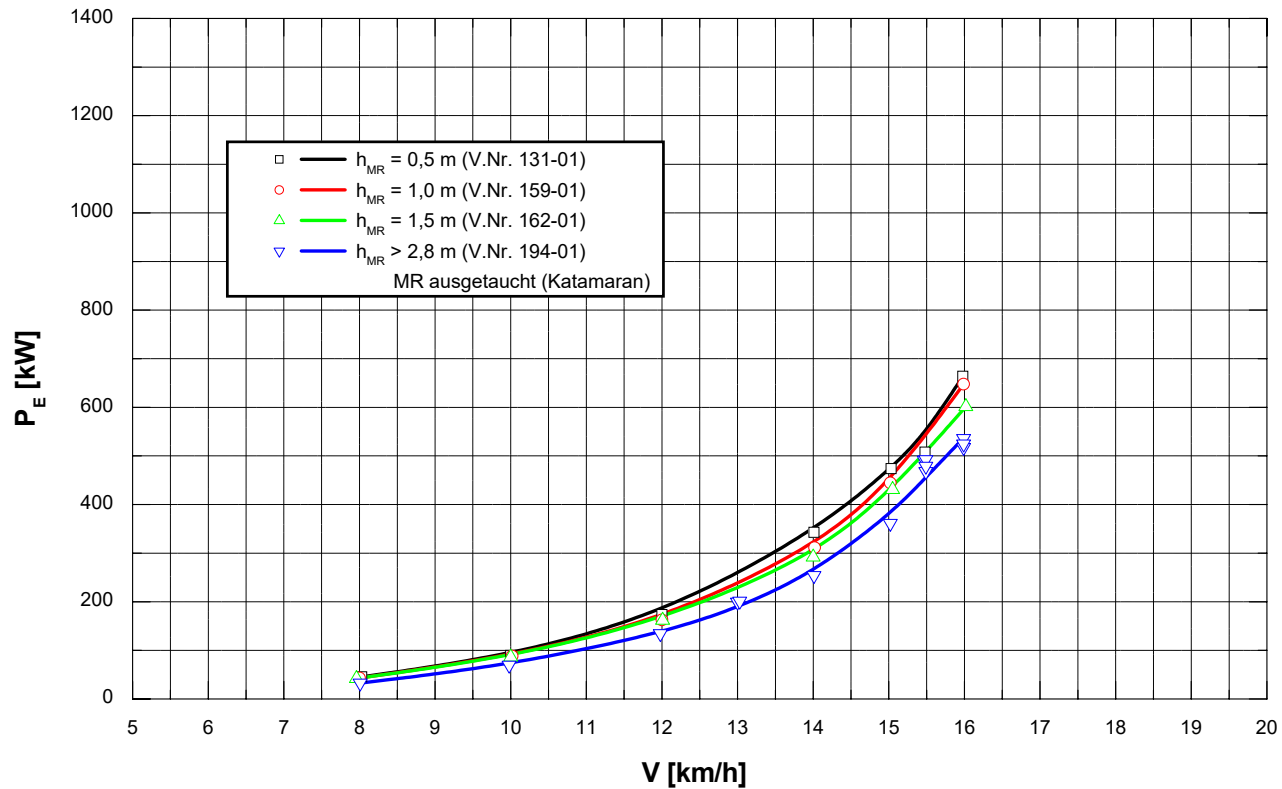
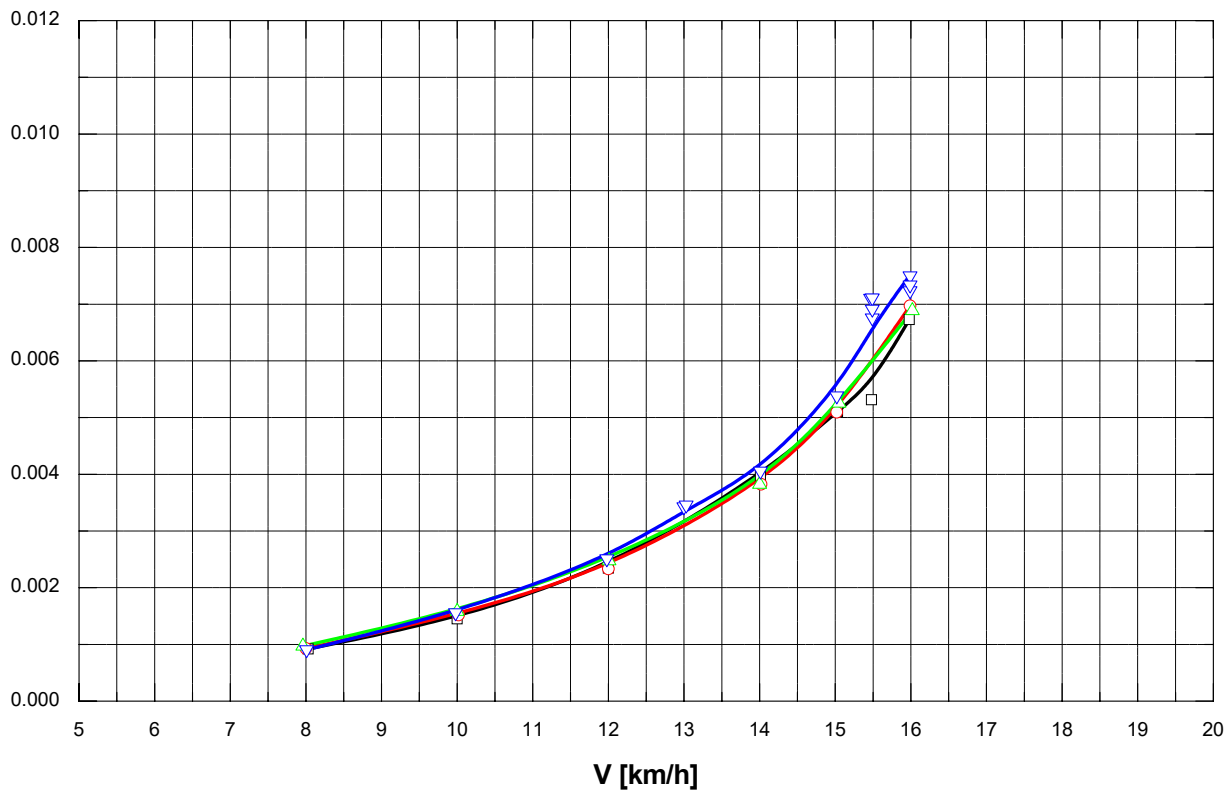
Variation Höhe MR-Boden ü. Basis - Widerstand -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 2), $L_{OA} = 85,0$ m; $B_{SR} = 3,68$ m

MR-Bug: Typ Ponton
 $h = 4,0$ m ; $T = 2,8$ m
 seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 1 von 2



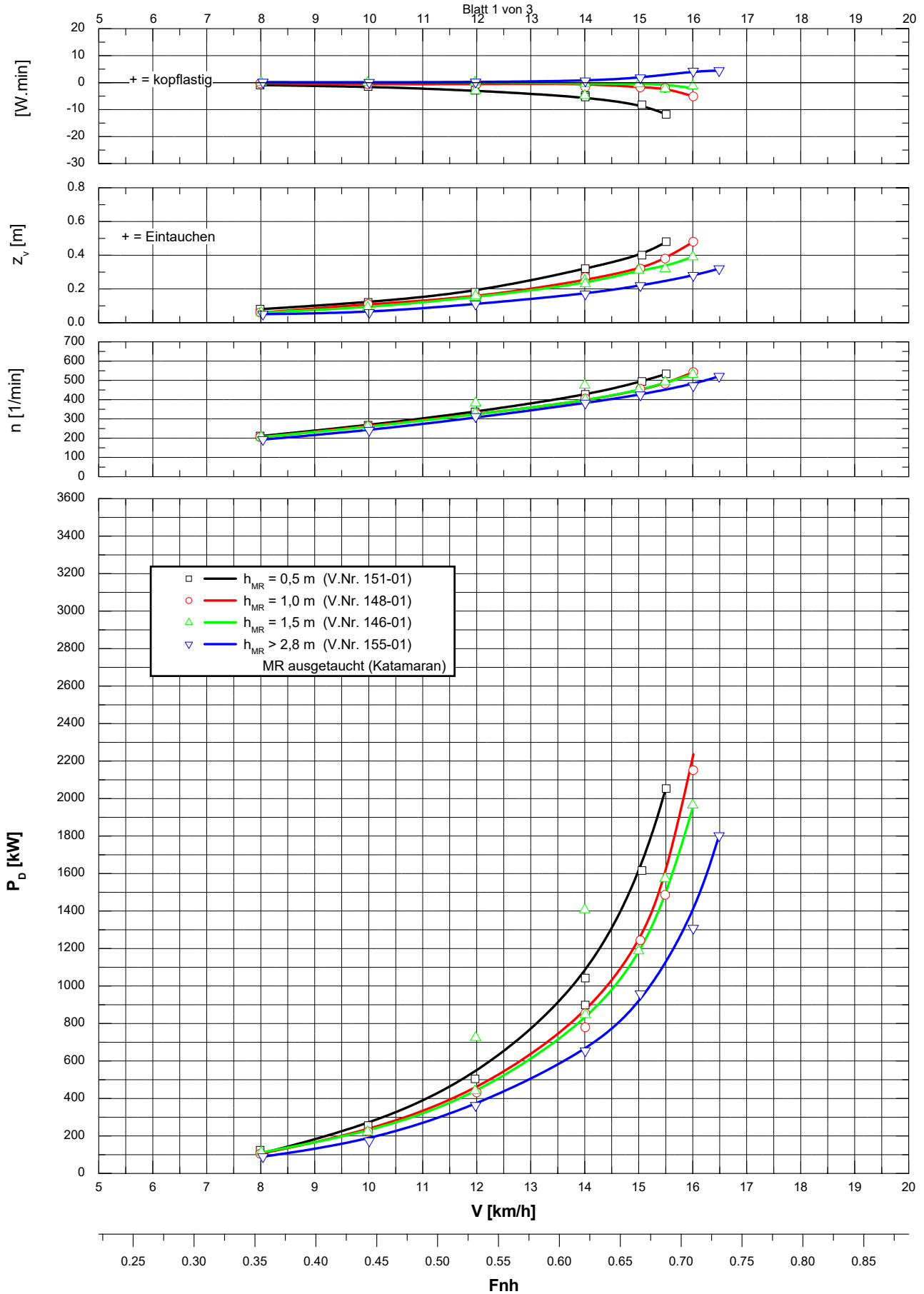
**Variation Höhe MR-Boden ü. Basis - Widerstand -
Spezifischer Widerstand**
Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 2), $L_{OA} = 85,0$ m; $B_{SR} = 3,68$ m
MR-Bug: Typ Ponton
 $h = 4,0$ m ; $T = 2,8$ m
seitl. unbegr. Fahrwasser
Blatt 2 von 2



Variation Höhe MR-Boden ü. Basis - Propulsion -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 3), $L_{OA} = 85,0$ m; $B_{SR} = 2,85$ m

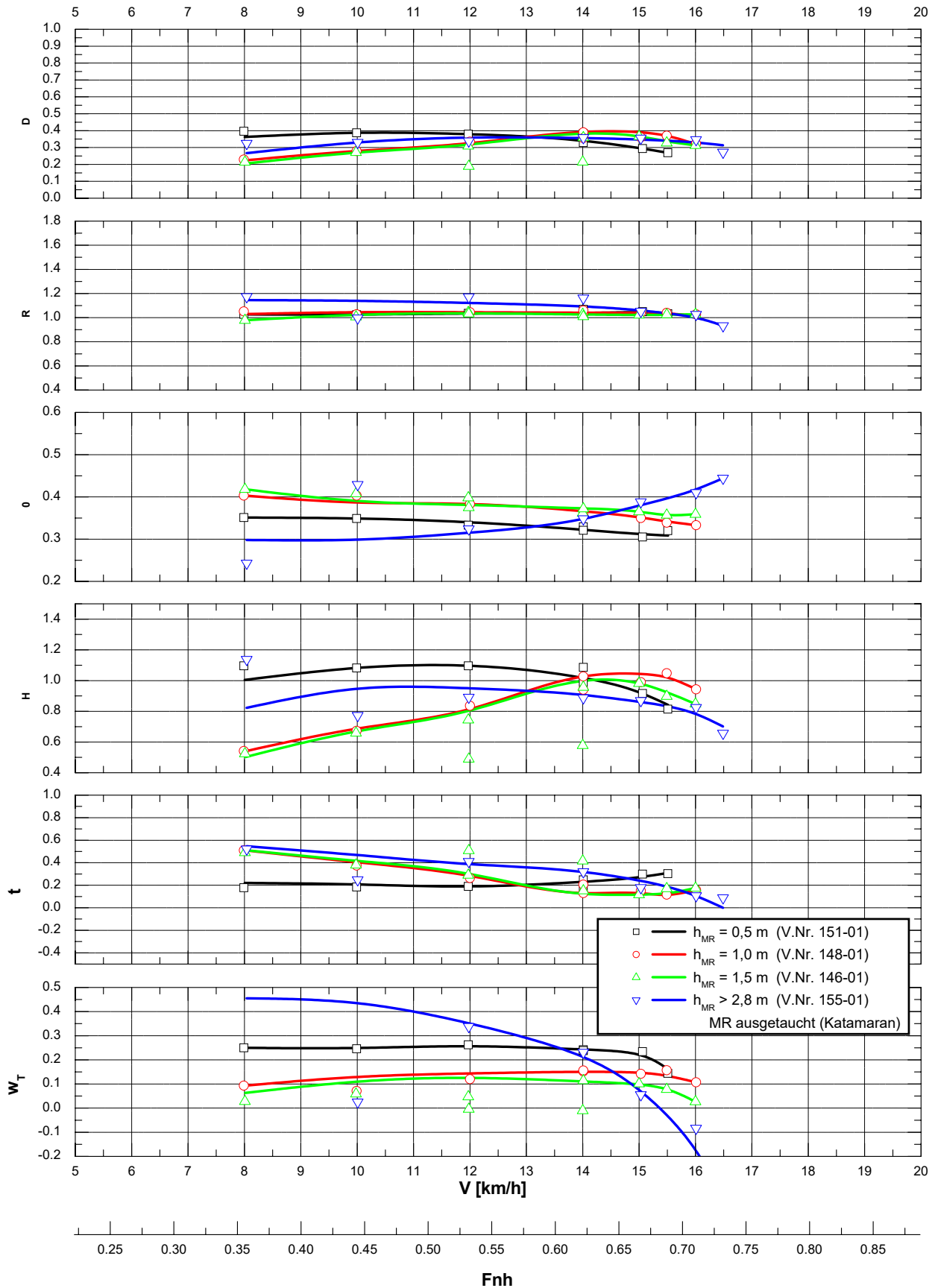
MR-Bug: Typ Ponton
 $h = 4,0$ m ; $T = 2,8$ m
 seittl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 1 von 3



Variation Höhe MR-Boden ü. Basis - Propulsion -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 3), $L_{OA} = 85,0$ m; $B_{SR} = 2,85$ m
 MR-Bug: Typ Ponton
 $h = 4,0$ m ; $T = 2,8$ m
 seittl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 2 von 3



Variation Höhe MR-Boden ü. Basis - Propulsion -

Spezifische Leistung

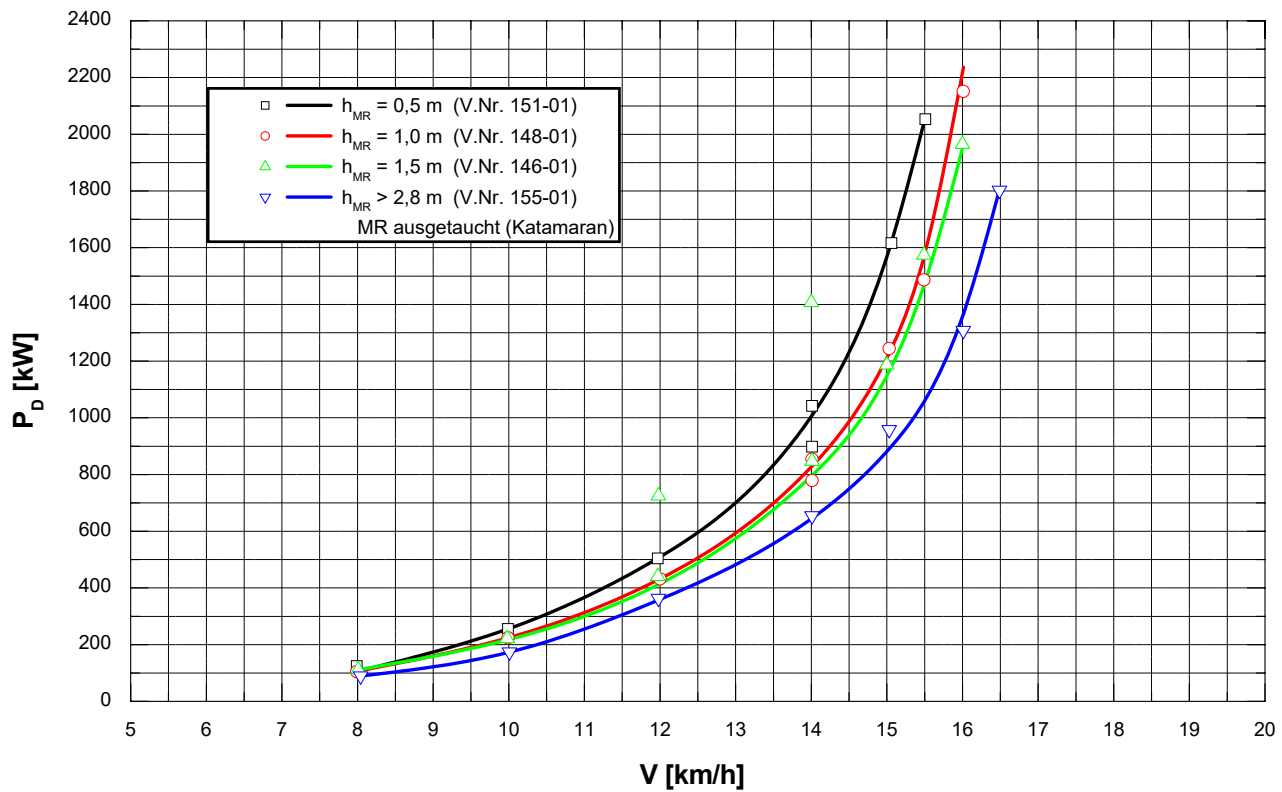
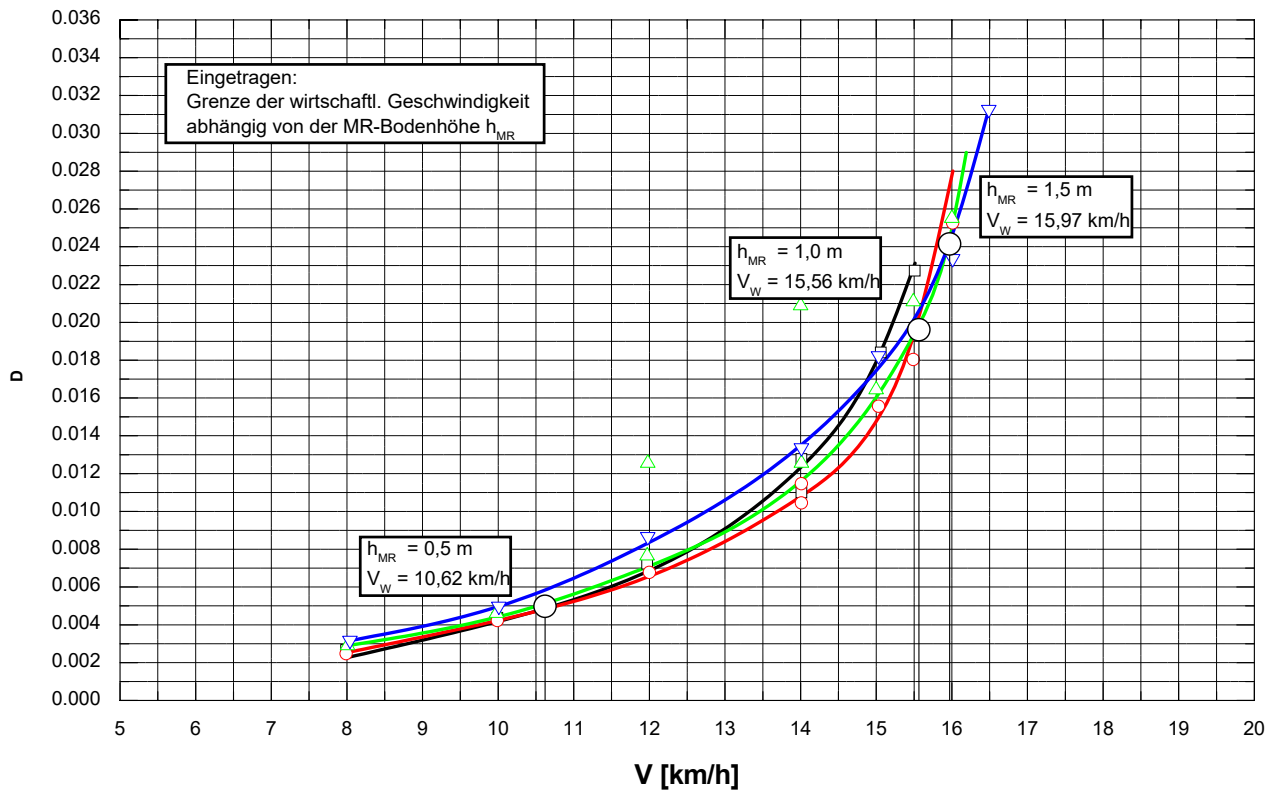
Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 3), $L_{OA} = 85,0$ m; $B_{SR} = 2,85$ m

MR-Bug: Typ Ponton

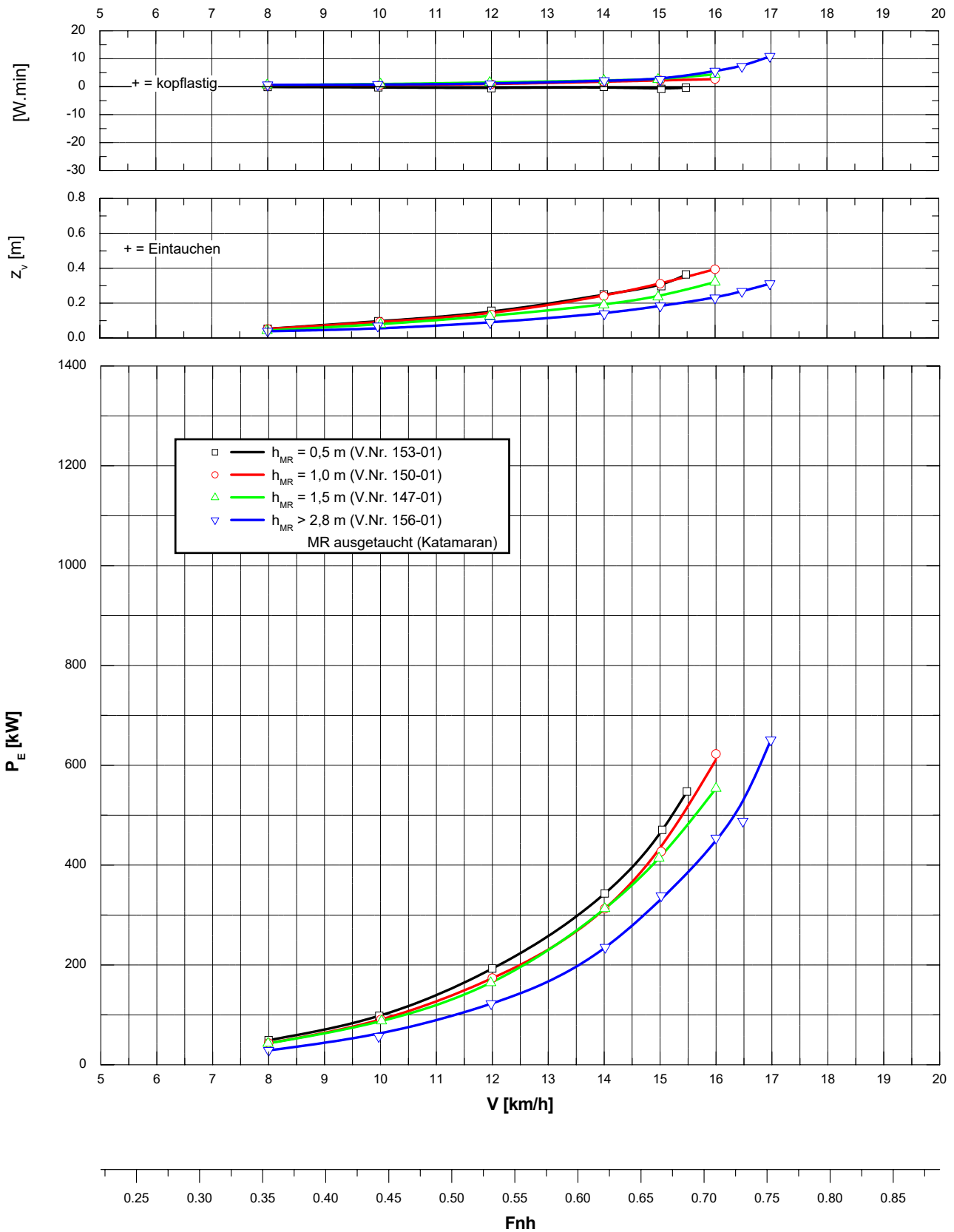
$h = 4,0$ m ; $T = 2,8$ m

seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 3 von 3

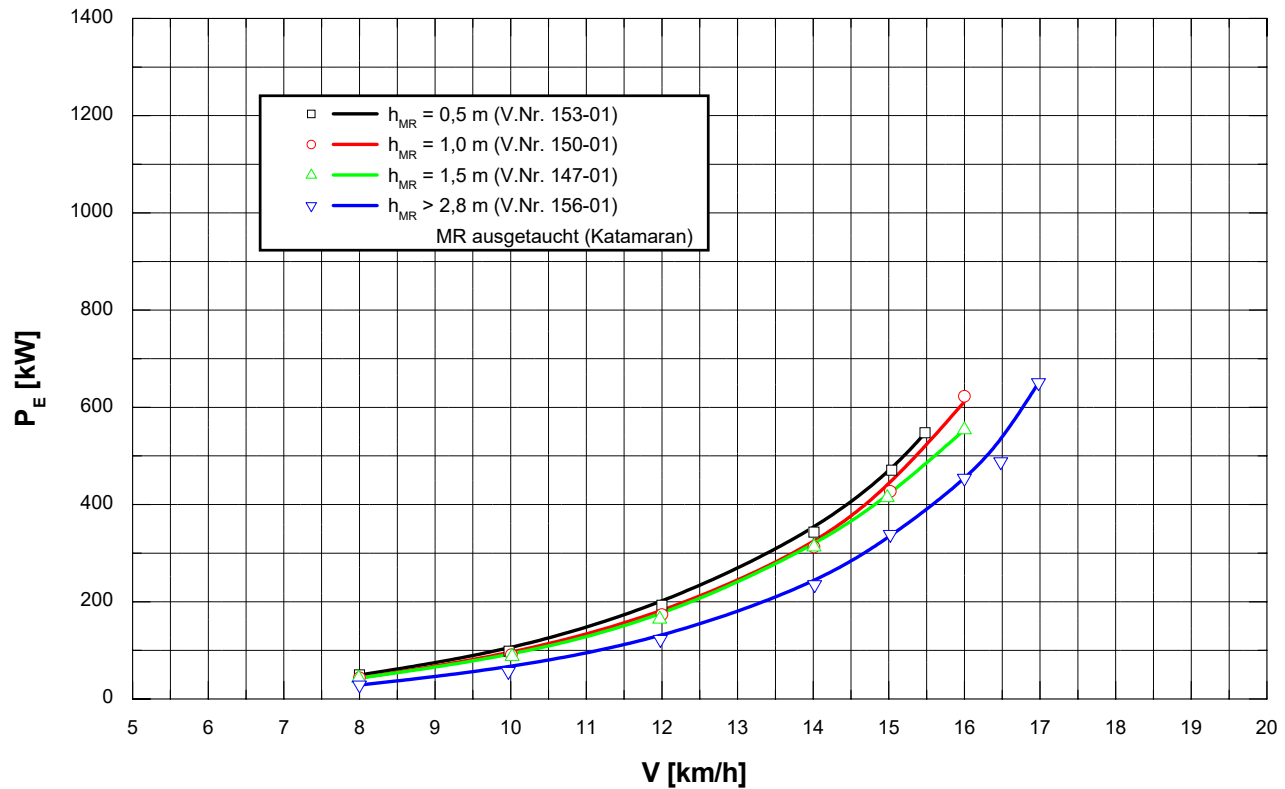
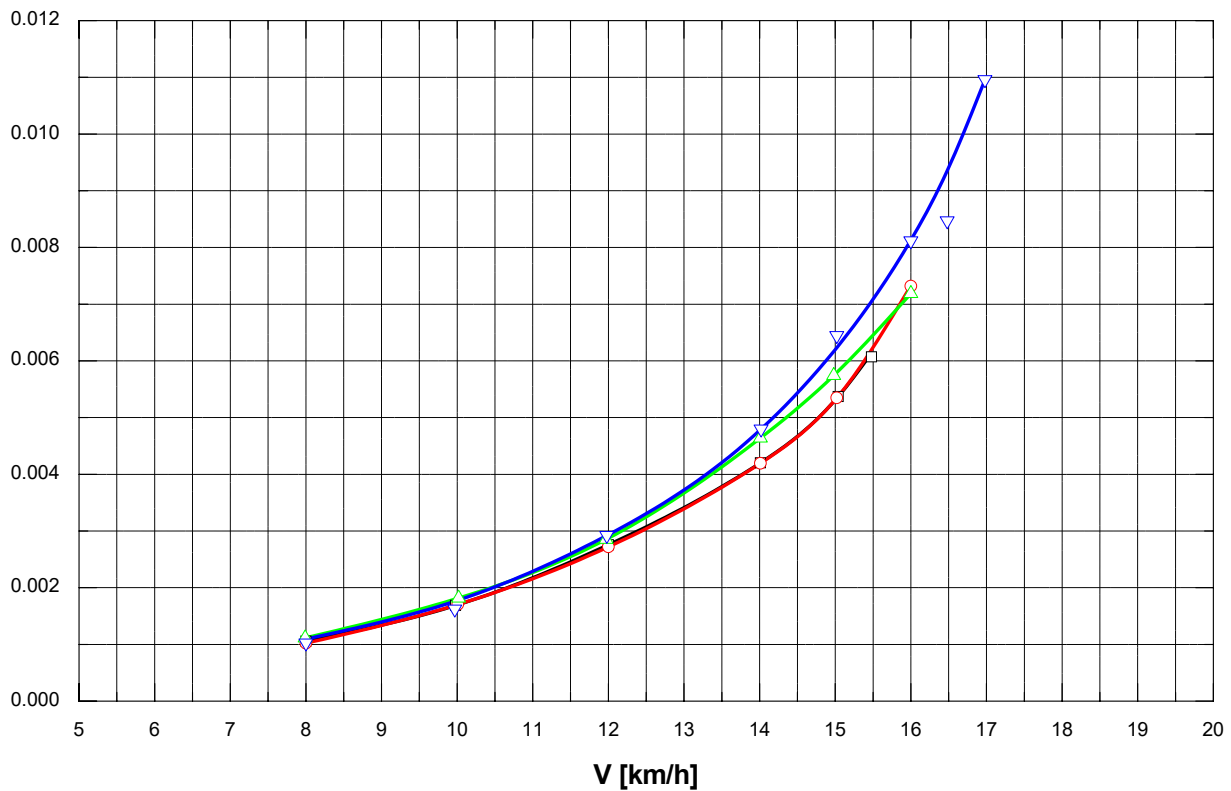


Variation Höhe MR-Boden ü. Basis - Widerstand -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 3), $L_{OA} = 85,0$ m; $B_{SR} = 2,85$ m
 MR-Bug: Typ Ponton
 $h = 4,0$ m; $T = 2,8$ m
 seütl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 1 von 2



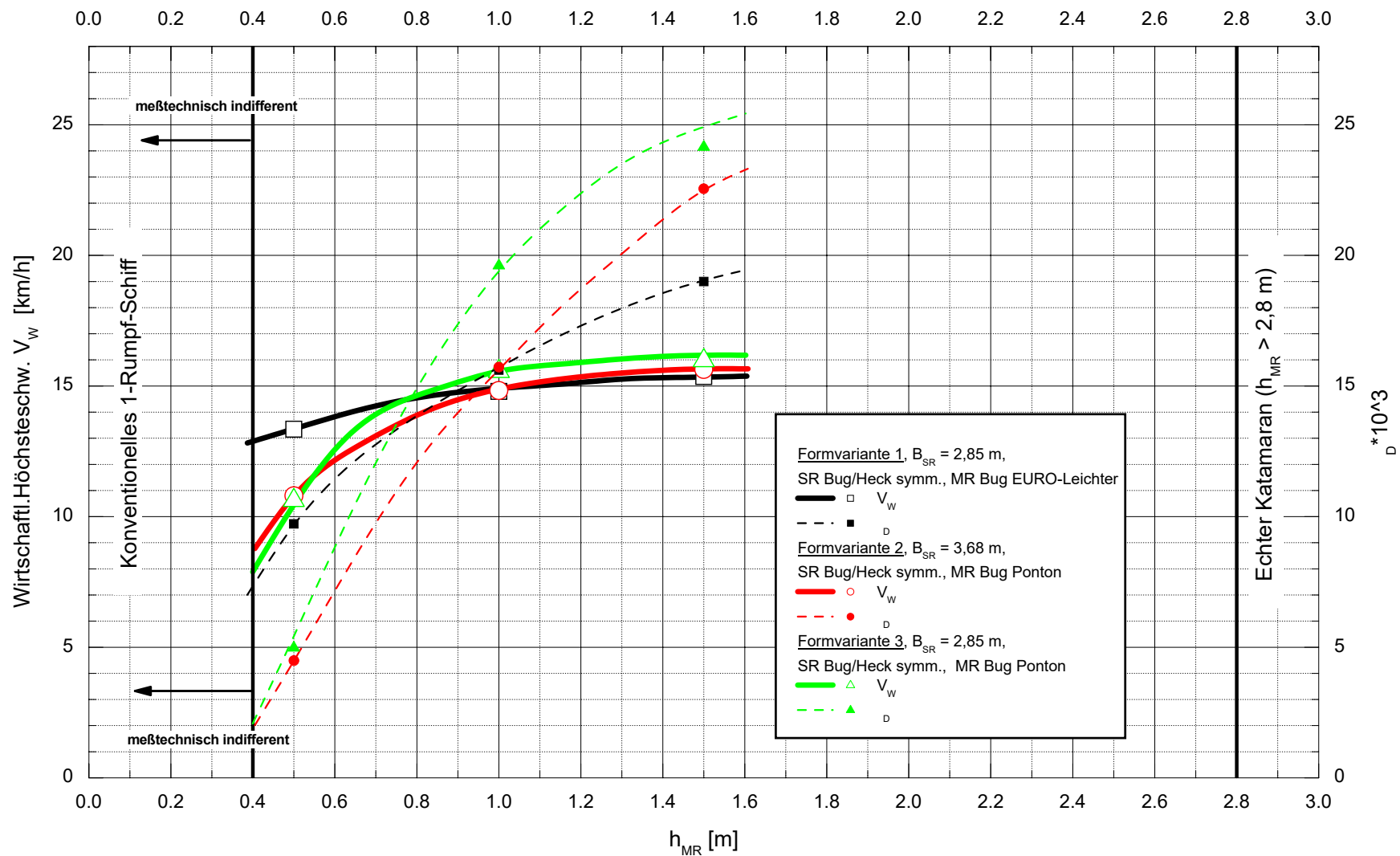
Variation Höhe MR-Boden ü. Basis - Widerstand -
Spezifischer Widerstand
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 3), $L_{OA} = 85,0$ m; $B_{SR} = 2,85$ m
 MR-Bug: Typ Ponton
 $h = 4,0$ m; $T = 2,8$ m
 seidl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 2 von 2



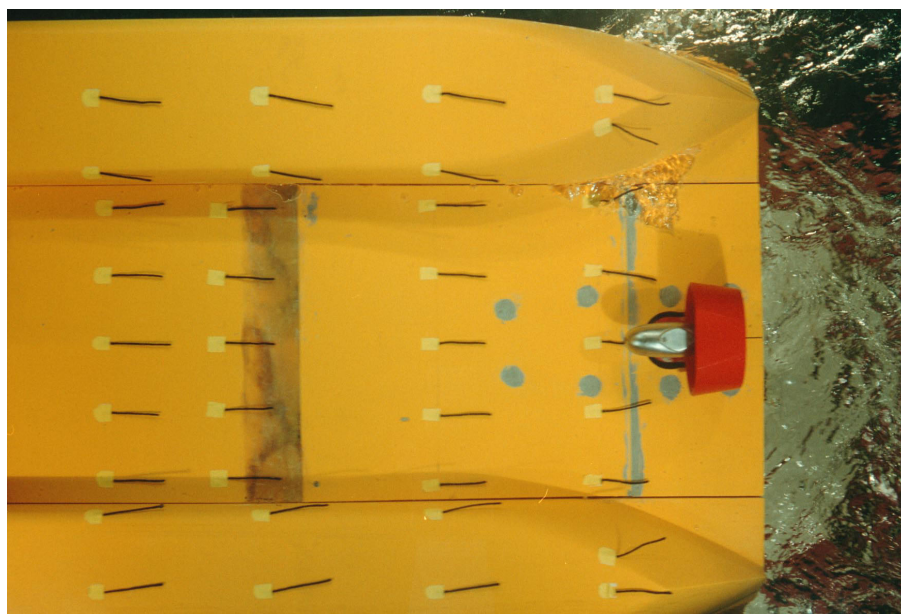
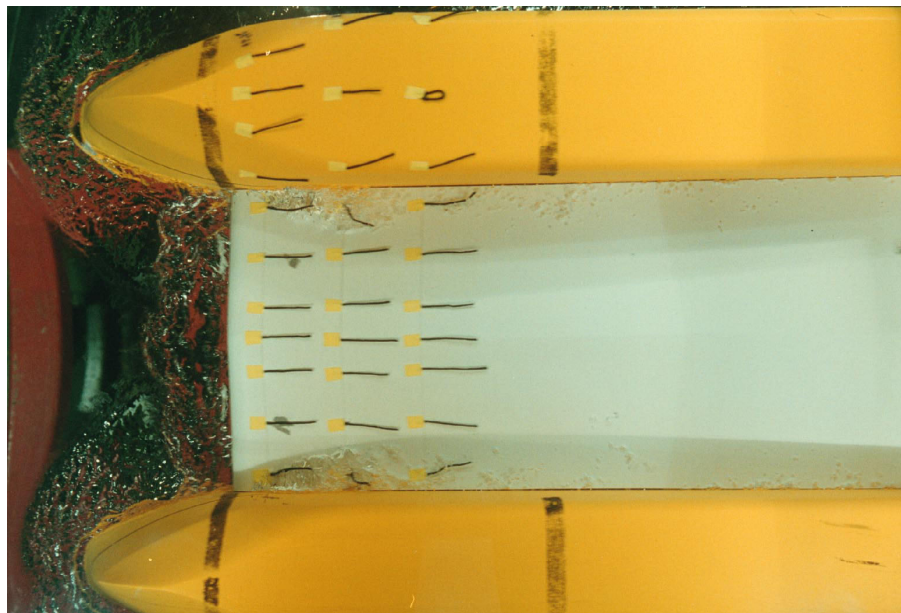
Variation der MR-Höhe ü. Basis
Semikat. (Kanalschiff), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$; $T = 2,8 \text{ m}$

Wirtschl. Höchstgeschw. und
zugehörige spez. Leistung als
Funktion der MR-Höhe





Kanalschiff, Formvariante 3,
Propulsion, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 148-01-01)



Kanalschiff, Formvariante 3,
Propulsion, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 148-01-01)

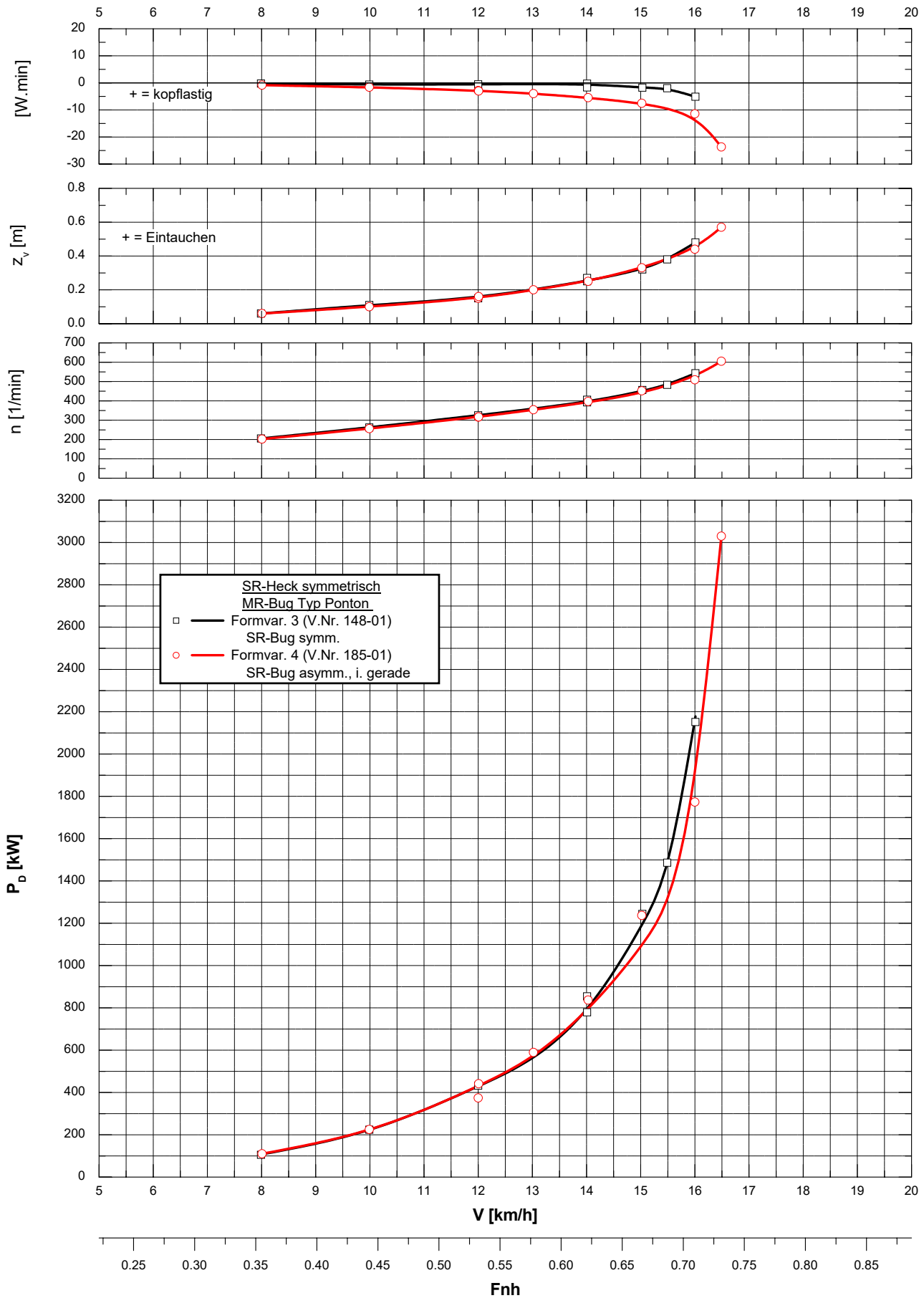
Formvariation SR-Bug - Propulsion -

Semikat. (Kanalschiff), $L_{OA} = 85,0$ m

$h = 4,0$ m ; $h_{MR} = 1,0$ m ; $T = 2,8$ m

seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 1 von 3



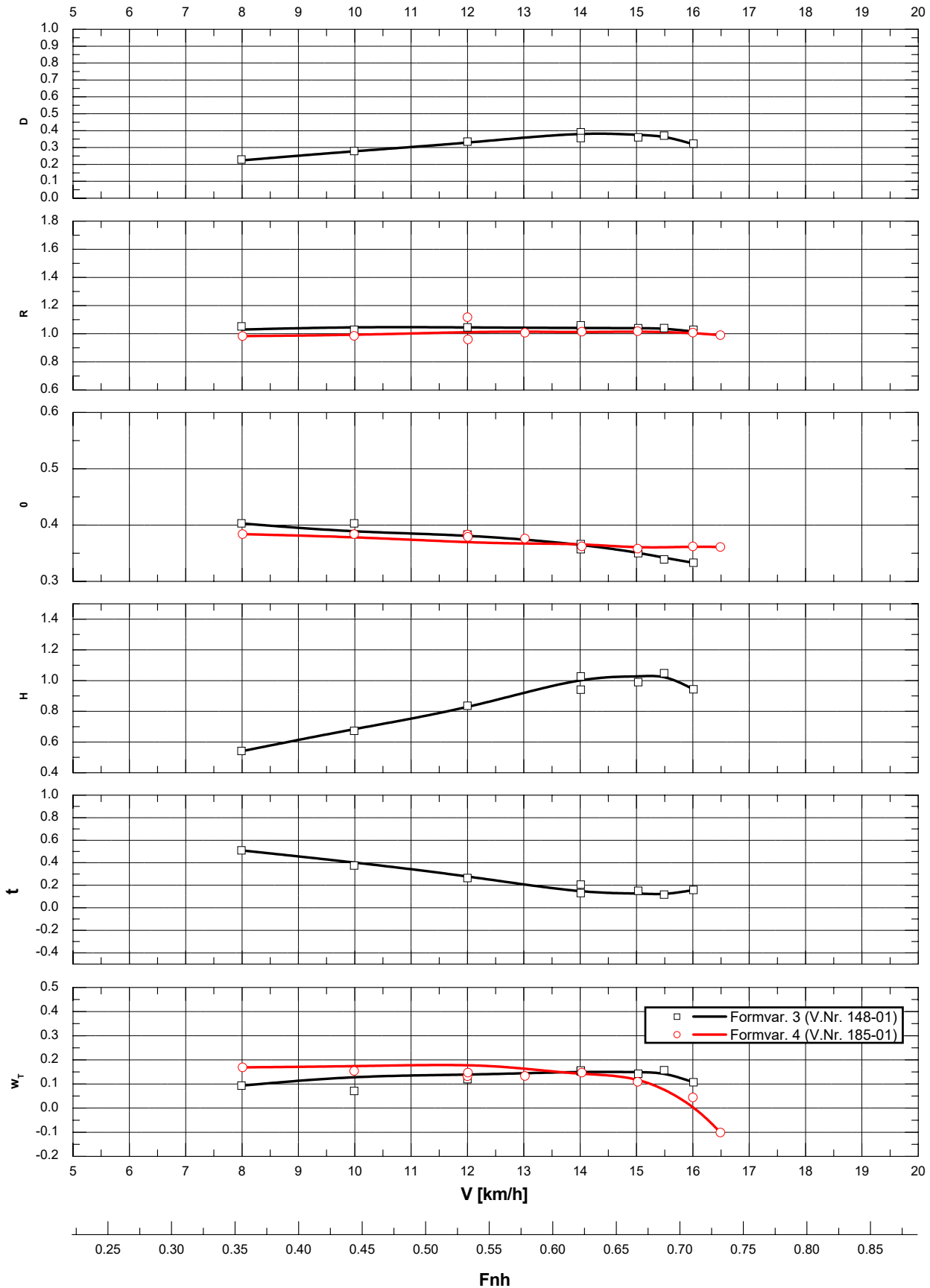
Formvariation SR-Bug - Propulsion -

Semikat. (Kanalschiff), $L_{OA} = 85,0$ m

$h = 4,0$ m ; $h_{MR} = 1,0$ m ; $T = 2,8$ m

seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 2 von 3



Formvariation SR-Bug - Propulsion -

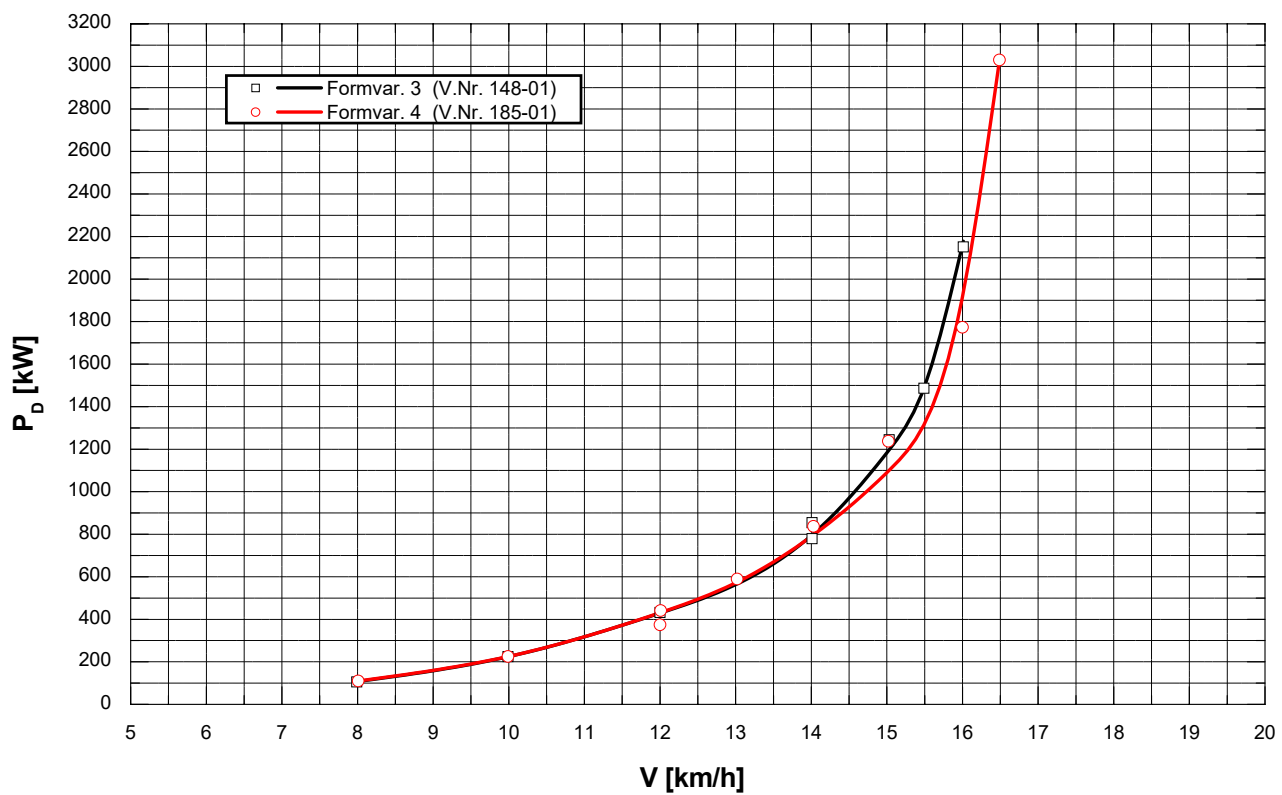
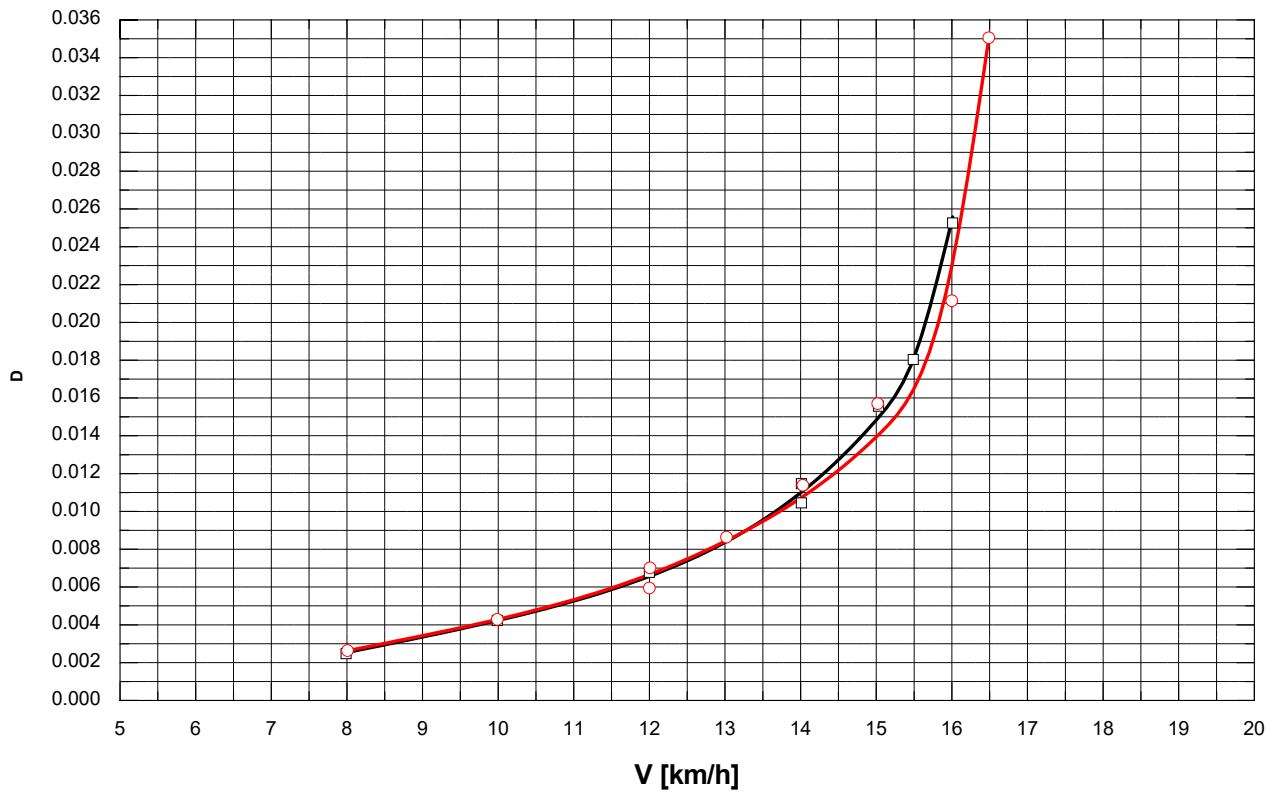
Spezifische Leistung

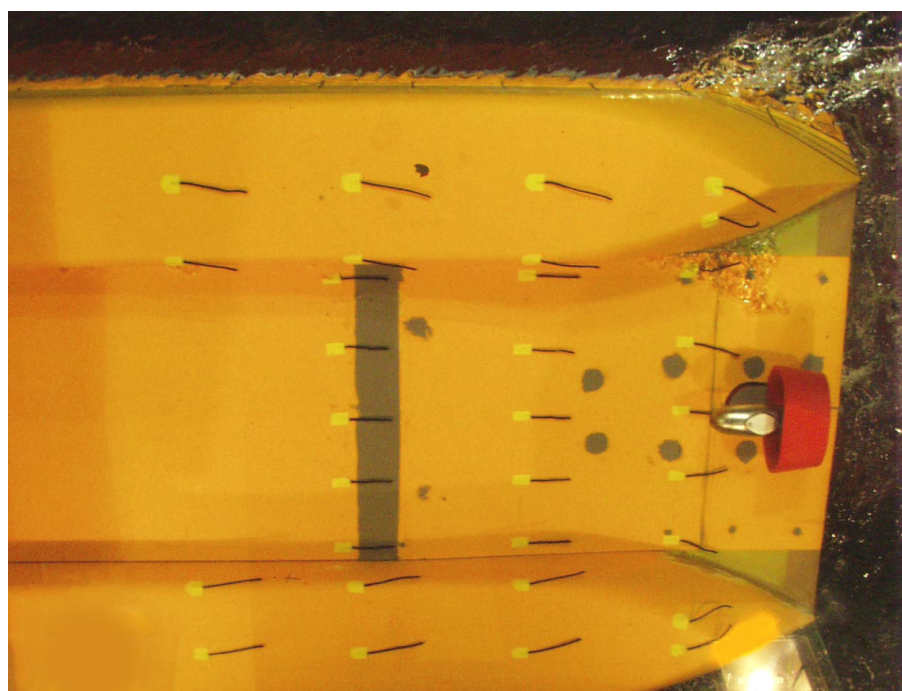
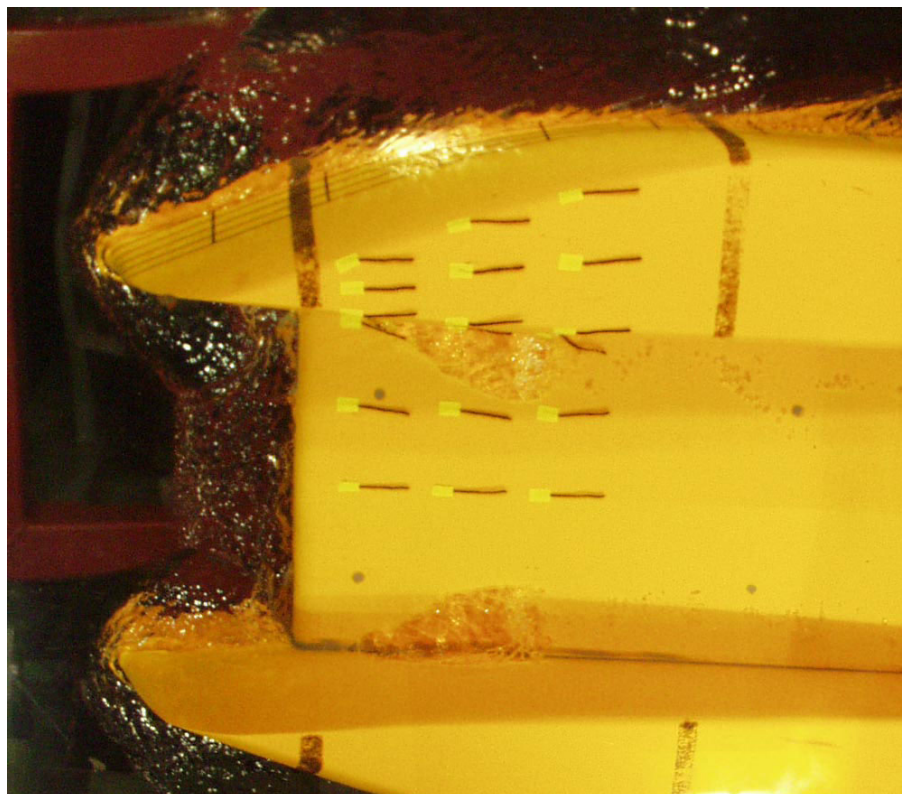
Semikat. (Kanalschiff), $L_{OA} = 85,0$ m

$h = 4,0$ m ; $h_{MR} = 1,0$ m ; $T = 2,8$ m

seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 3 von 3





Kanalschiff, Formvariante 4,
Propulsion, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 185-01-06)

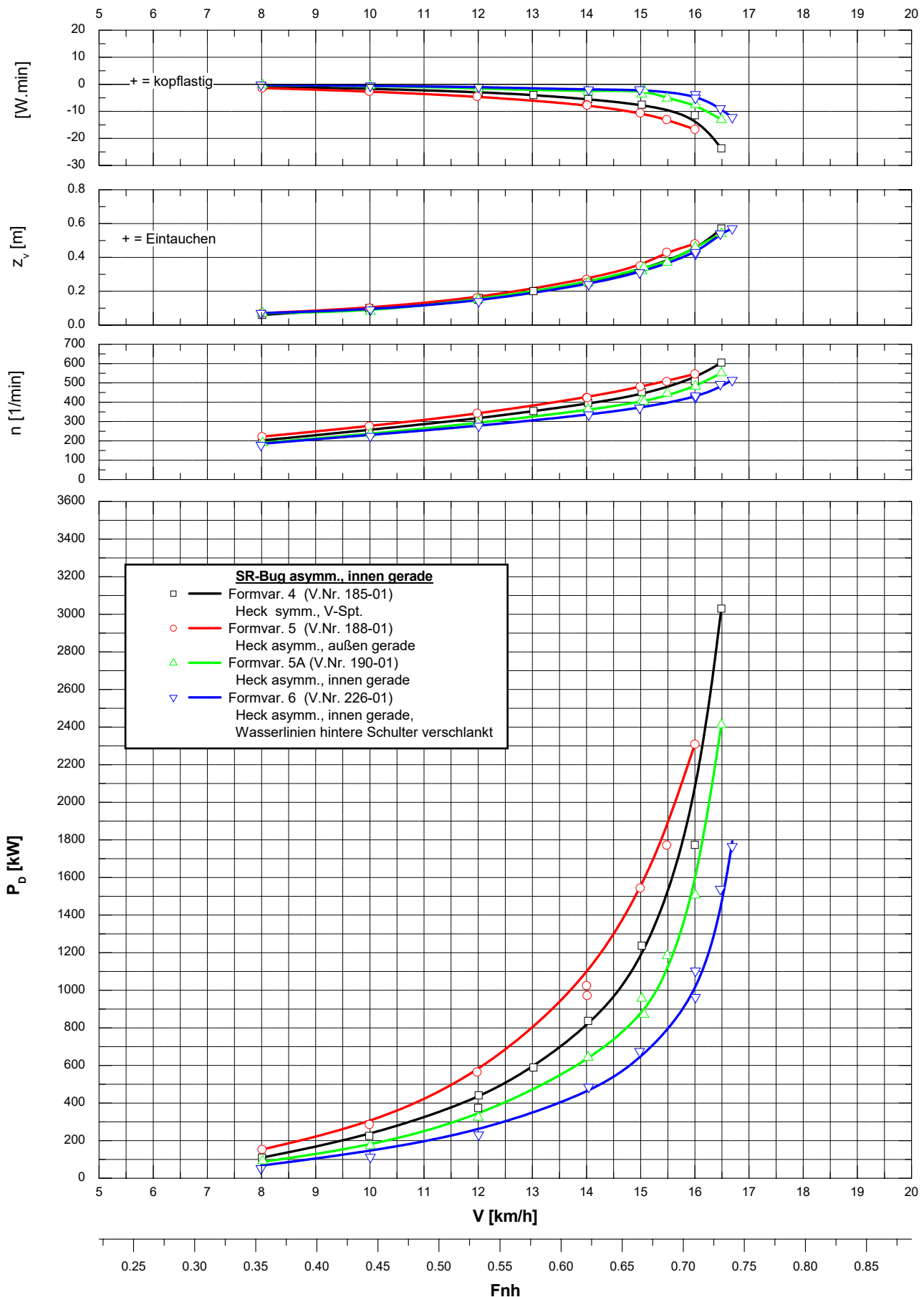
Formvariation SR-Heck - Propulsion -

Semikat. (Kanalschiff), $L_{OA} = 85,0$ m

$h = 4,0$ m ; $h_{MR} = 1,0$ m ; $T = 2,8$ m

seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 1 von 3



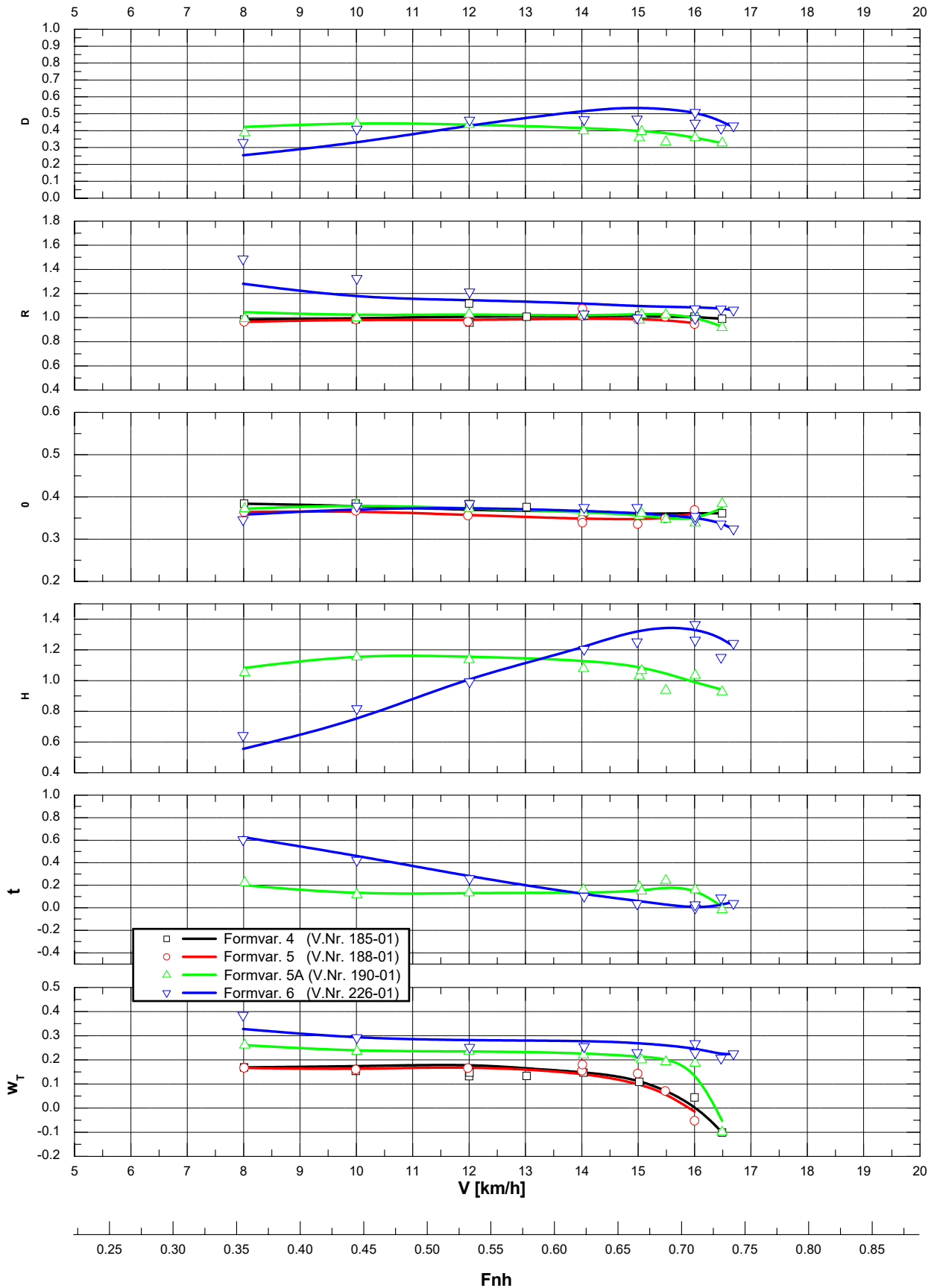
Formvariation SR-Heck - Propulsion -

Semikat. (Kanalschiff), $L_{OA} = 85,0$ m

$h = 4,0$ m ; $h_{MR} = 1,0$ m ; $T = 2,8$ m

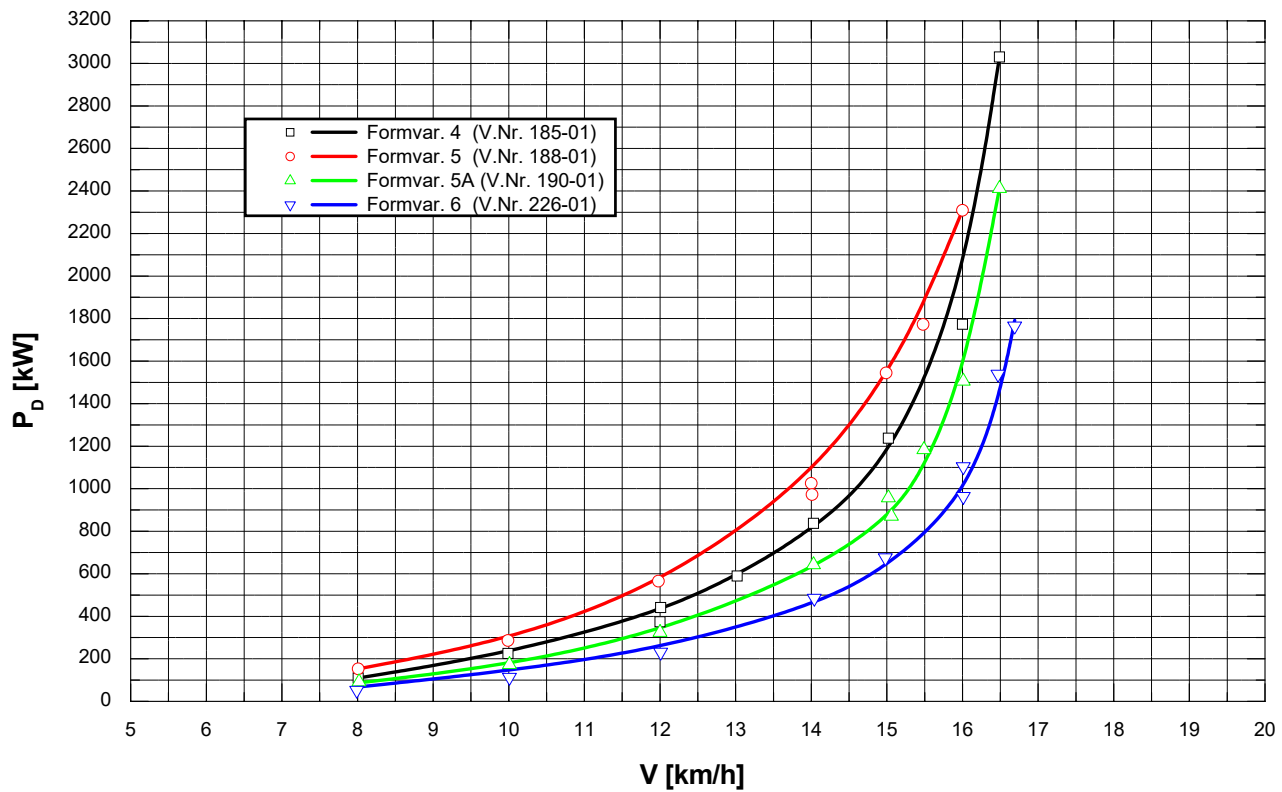
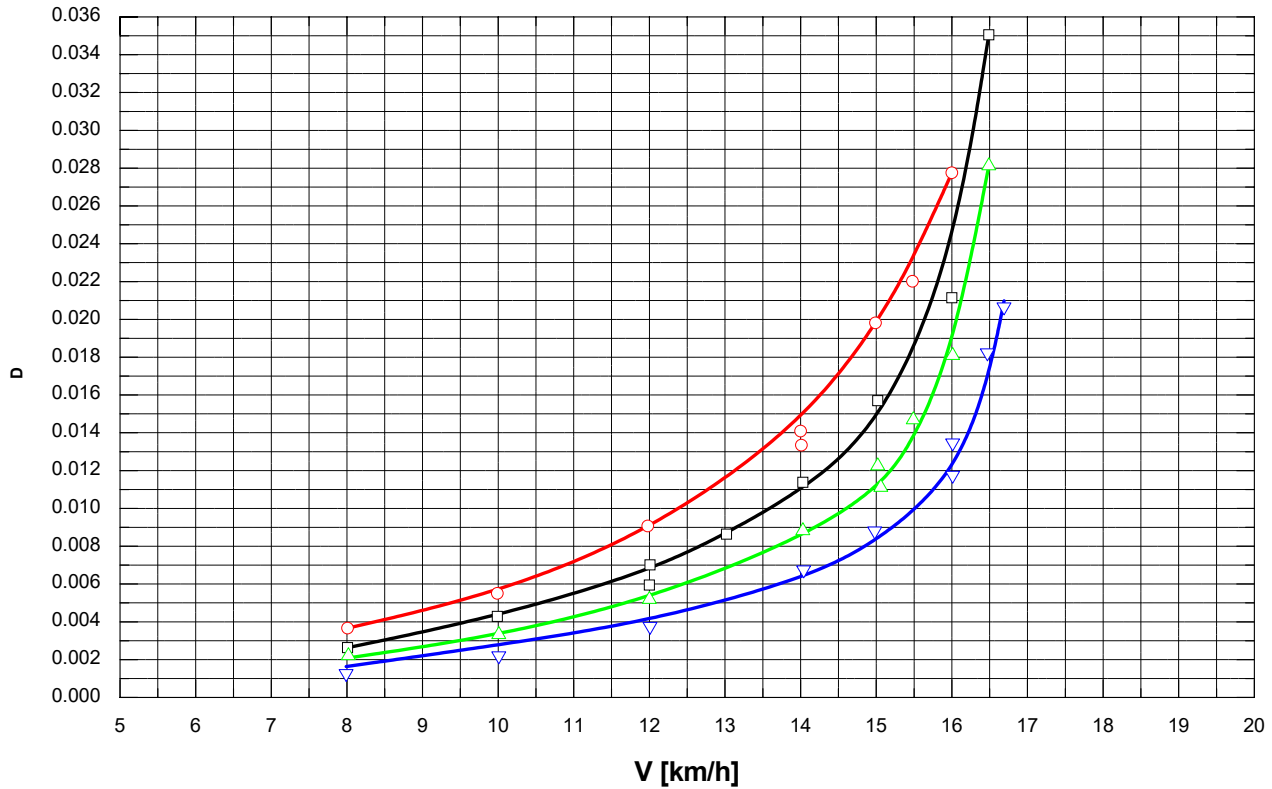
seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 2 von 3

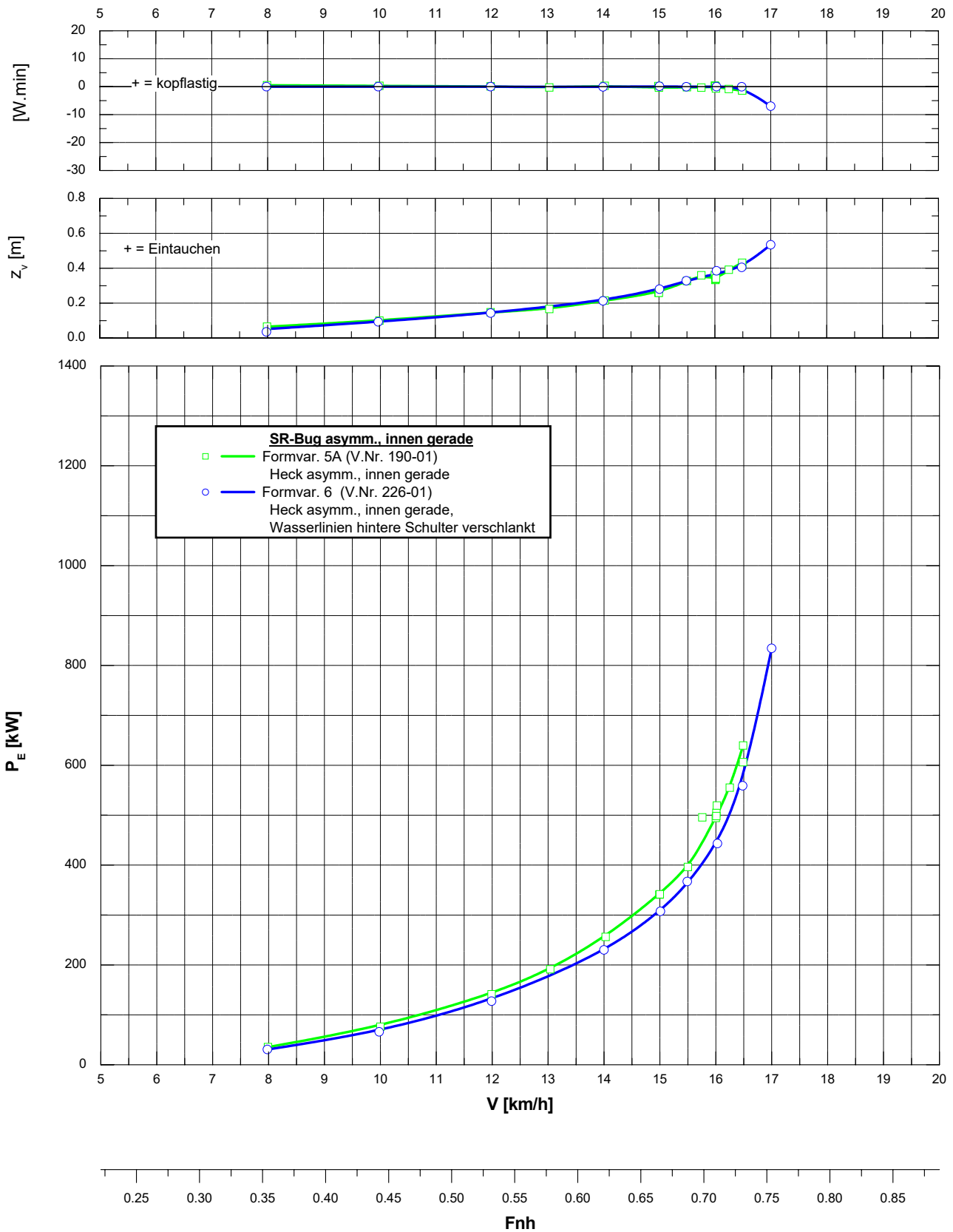


**Formvariation SR-Heck - Propulsion -
Spezifische Leistung**
Semikat. (Kanalschiff), $L_{OA} = 85,0$ m
 $h = 4,0$ m ; $h_{MR} = 1,0$ m ; $T = 2,8$ m
seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 3 von 3



Formvariation SR-Heck - Widerstand -
 Semikat. (Kanalschiff), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$; $T = 2,8 \text{ m}$
 seittl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 1 von 2



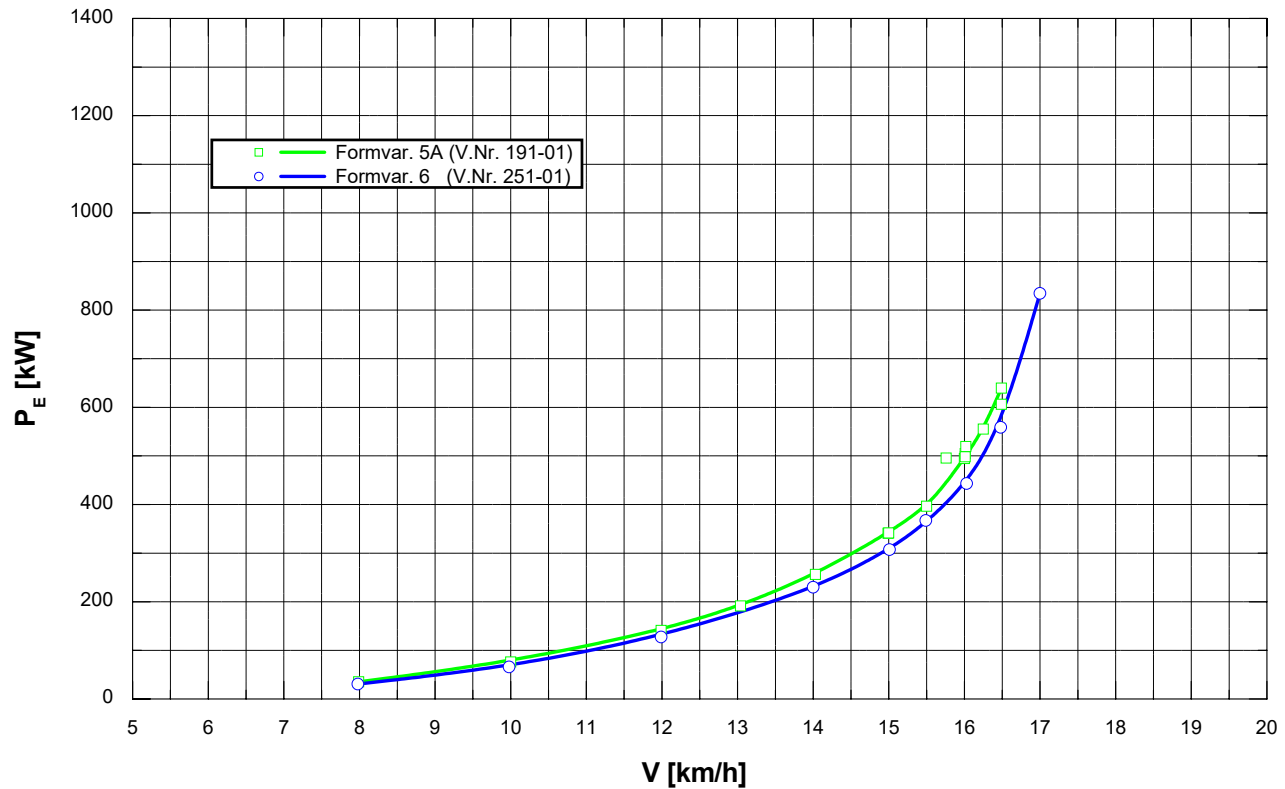
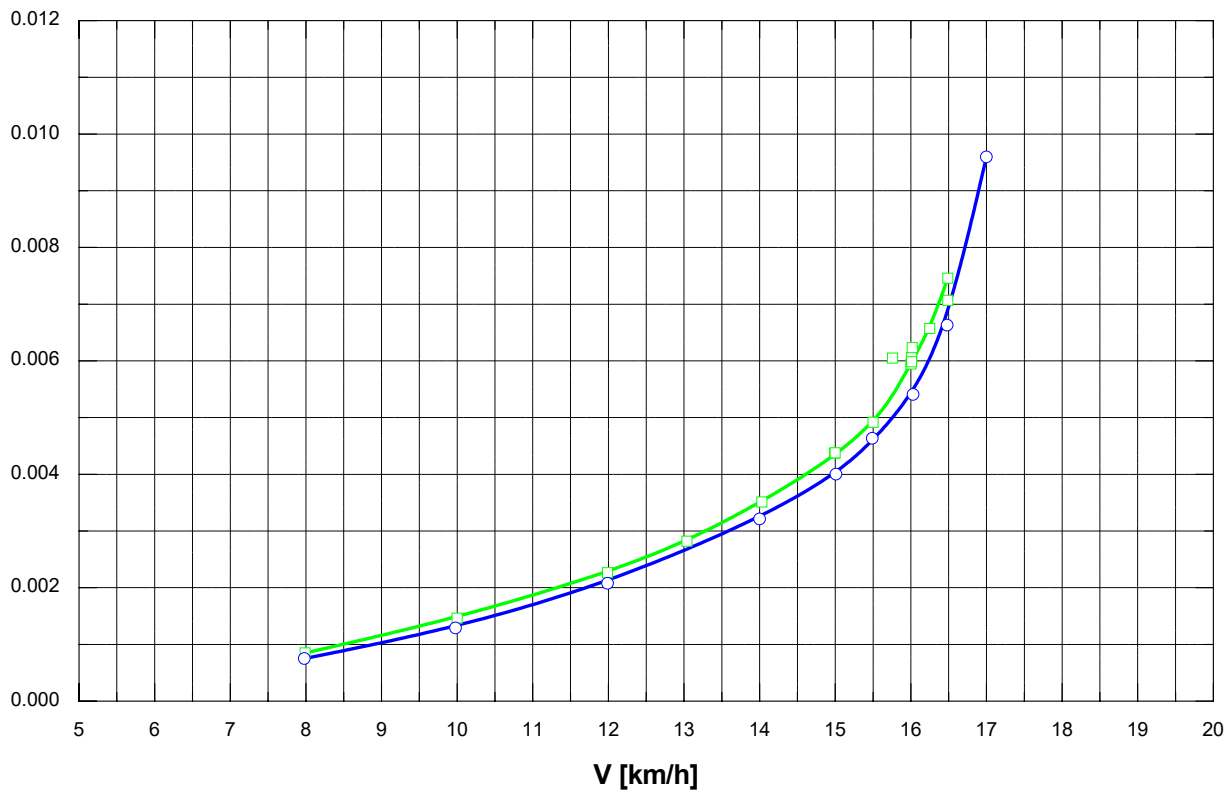
Formvariation SR-Heck - Widerstand - Spezifischer Widerstand

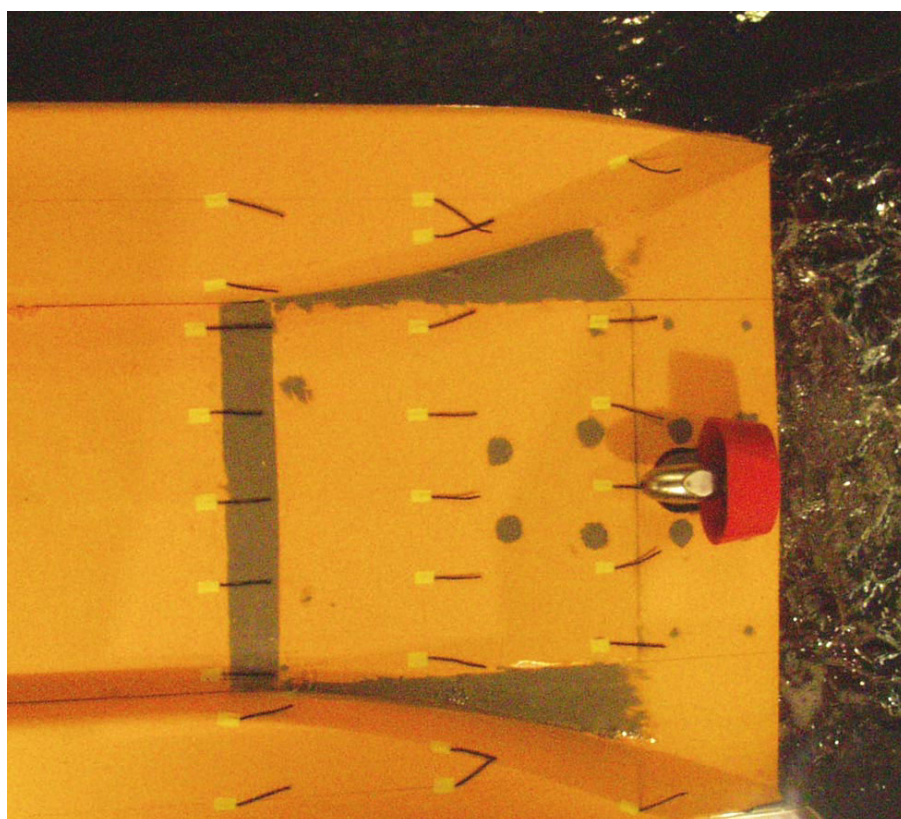
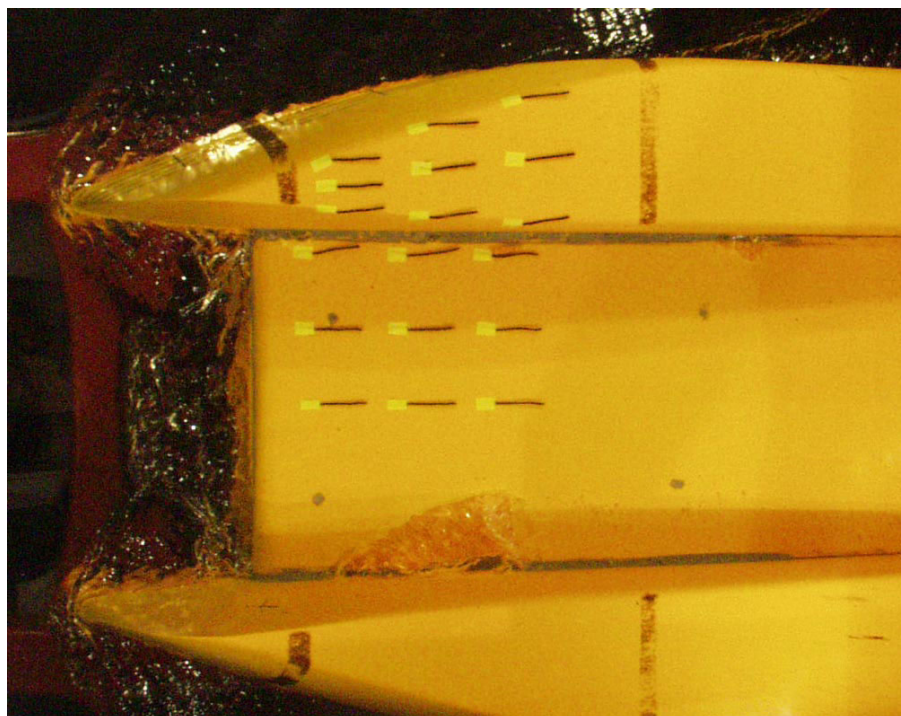
Semikat. (Kanalschiff), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$

$h = 4,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$; $T = 2,8 \text{ m}$

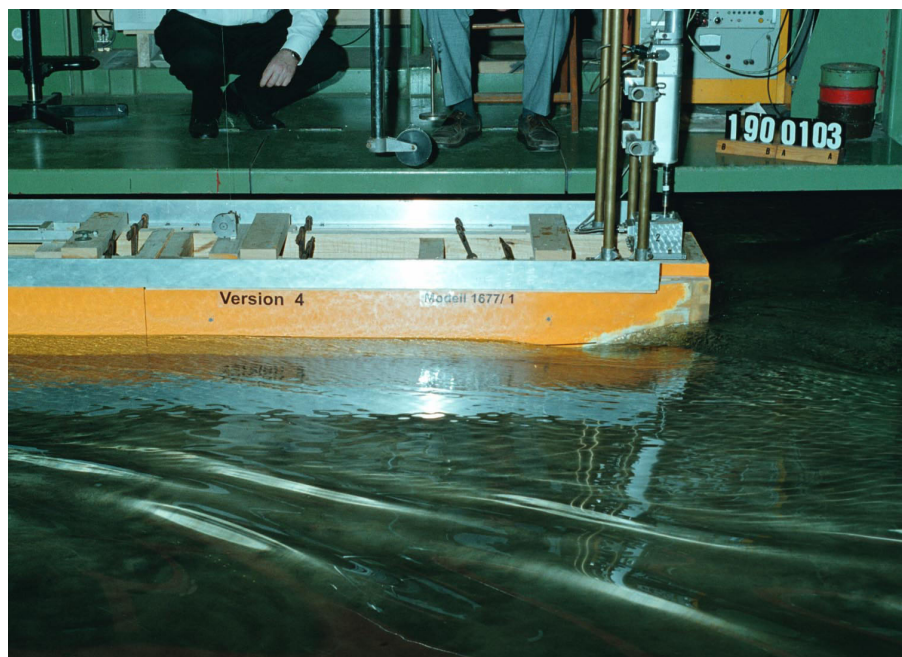
seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 2 von 2





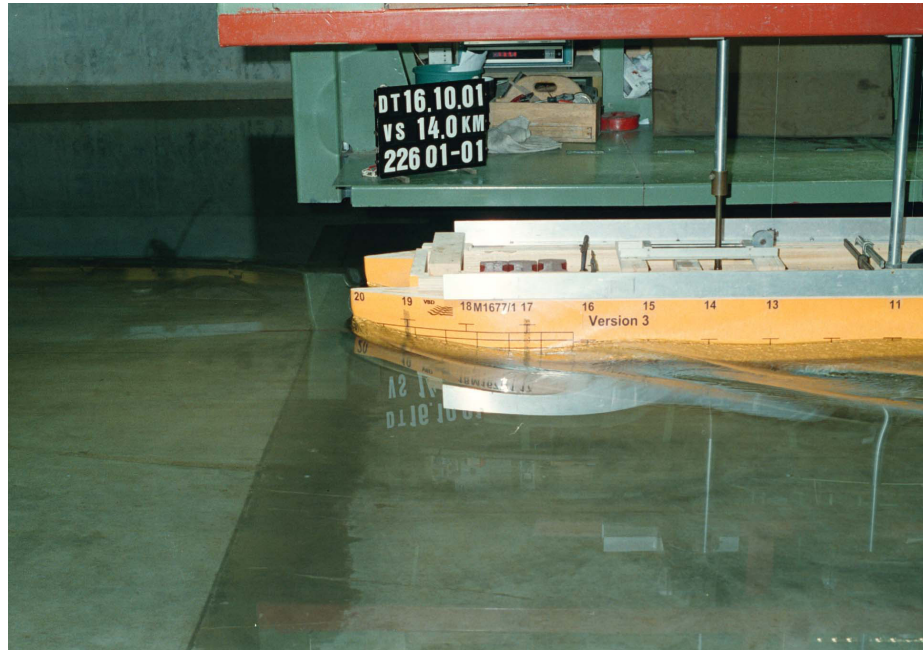
Kanalschiff, Formvariante 5,
Propulsion, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 188-01)



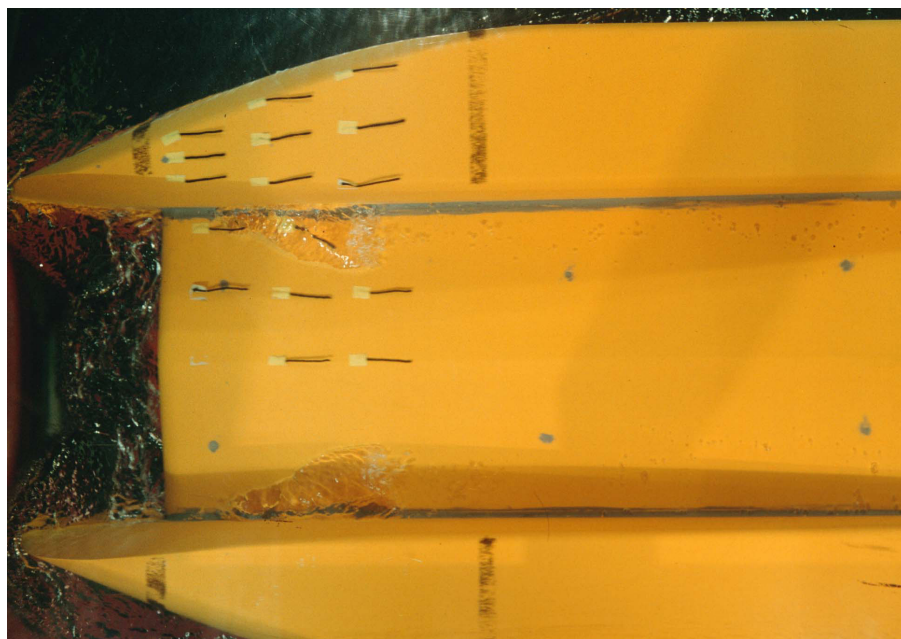
Kanalschiff, Formvariante 5A,
Propulsion, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 190-01-03)



Kanalschiff, Formvariante 5A,
Propulsion, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 190-01-03)

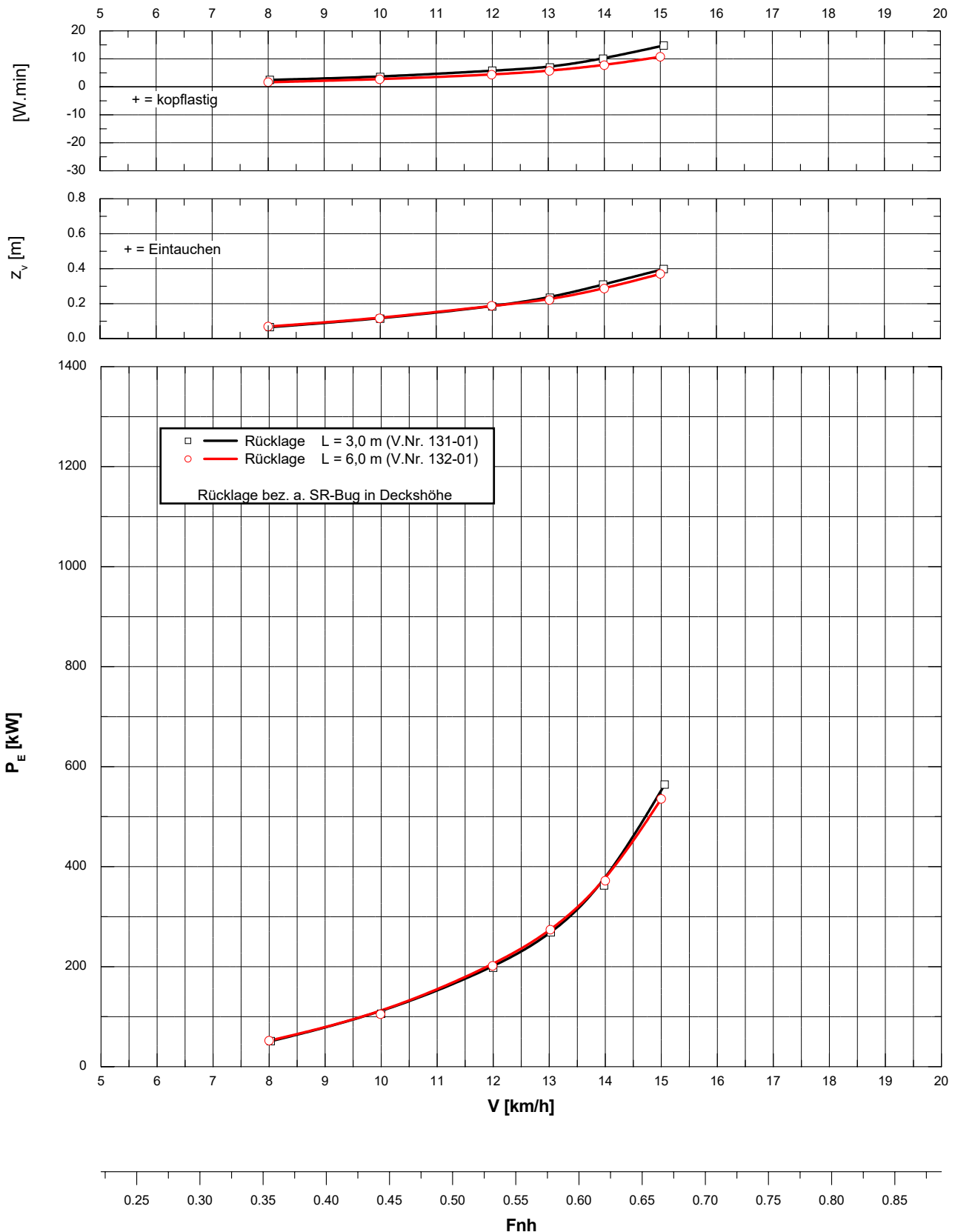


Kanalschiff, Formvariante 6,
Propulsion, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 226-01-01)

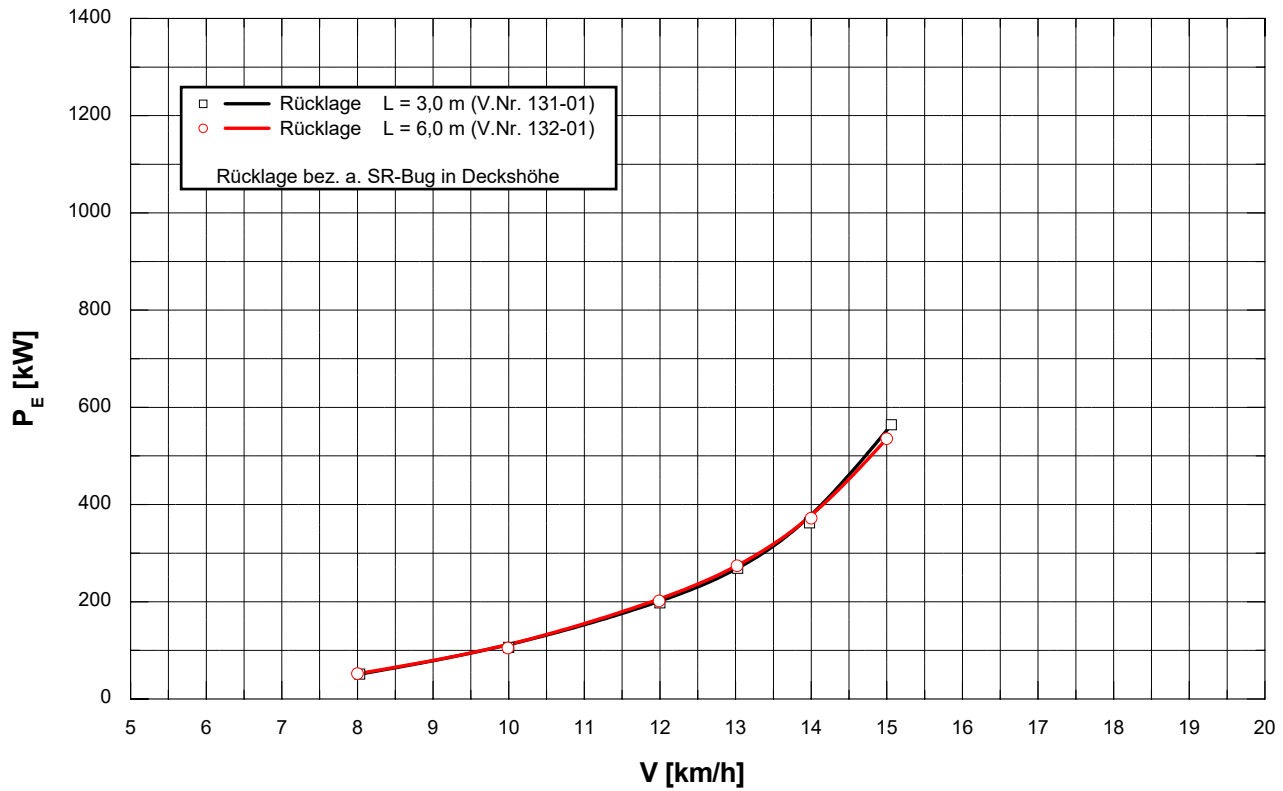
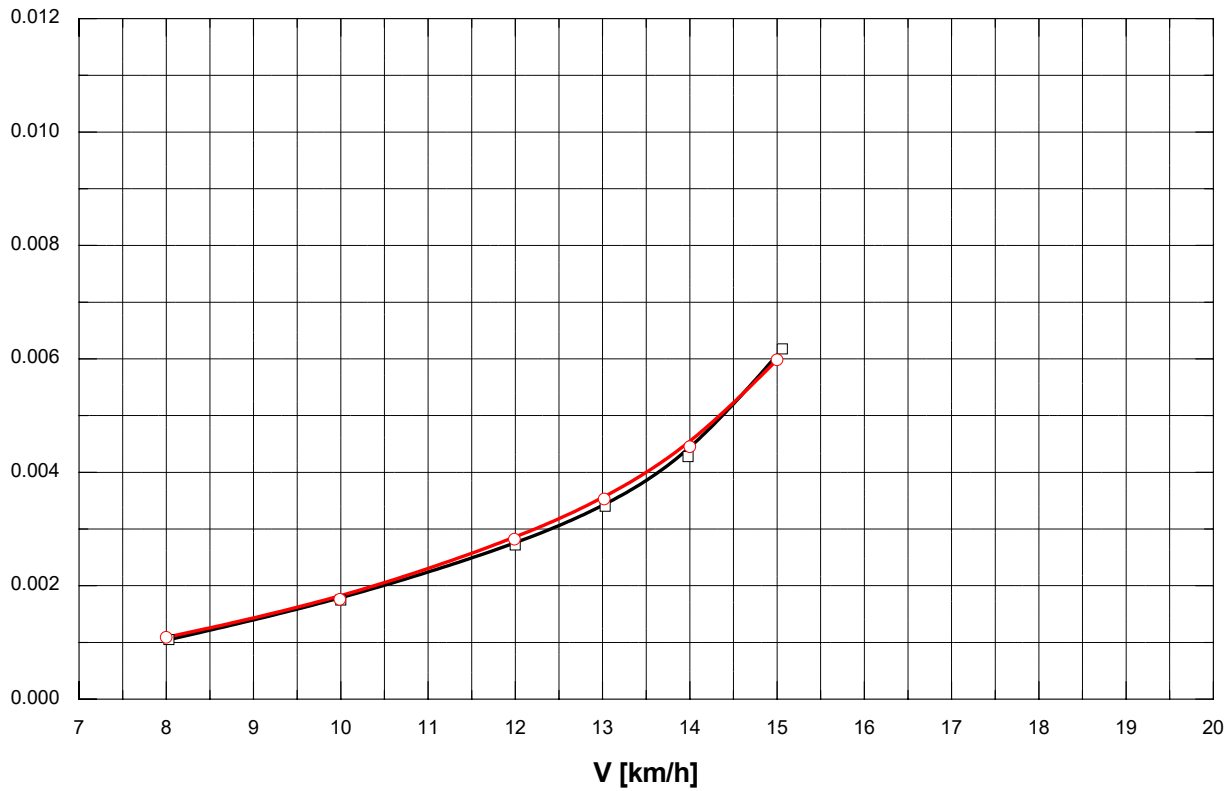


Kanalschiff, Formvariante 6,
Propulsion, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 226-01-01)

Variation MR-Bug-Rücklage - Widerstand -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar.1), $L_{OA} = 85,0$ m; $B_{SR} = 2,85$ m
 MR-Bug: Typ Euro-Leichter
 $h = 4,0$ m ; $h_{MR} = 0,5$ m ; $T = 2,8$ m
 seiltl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 1 von 2



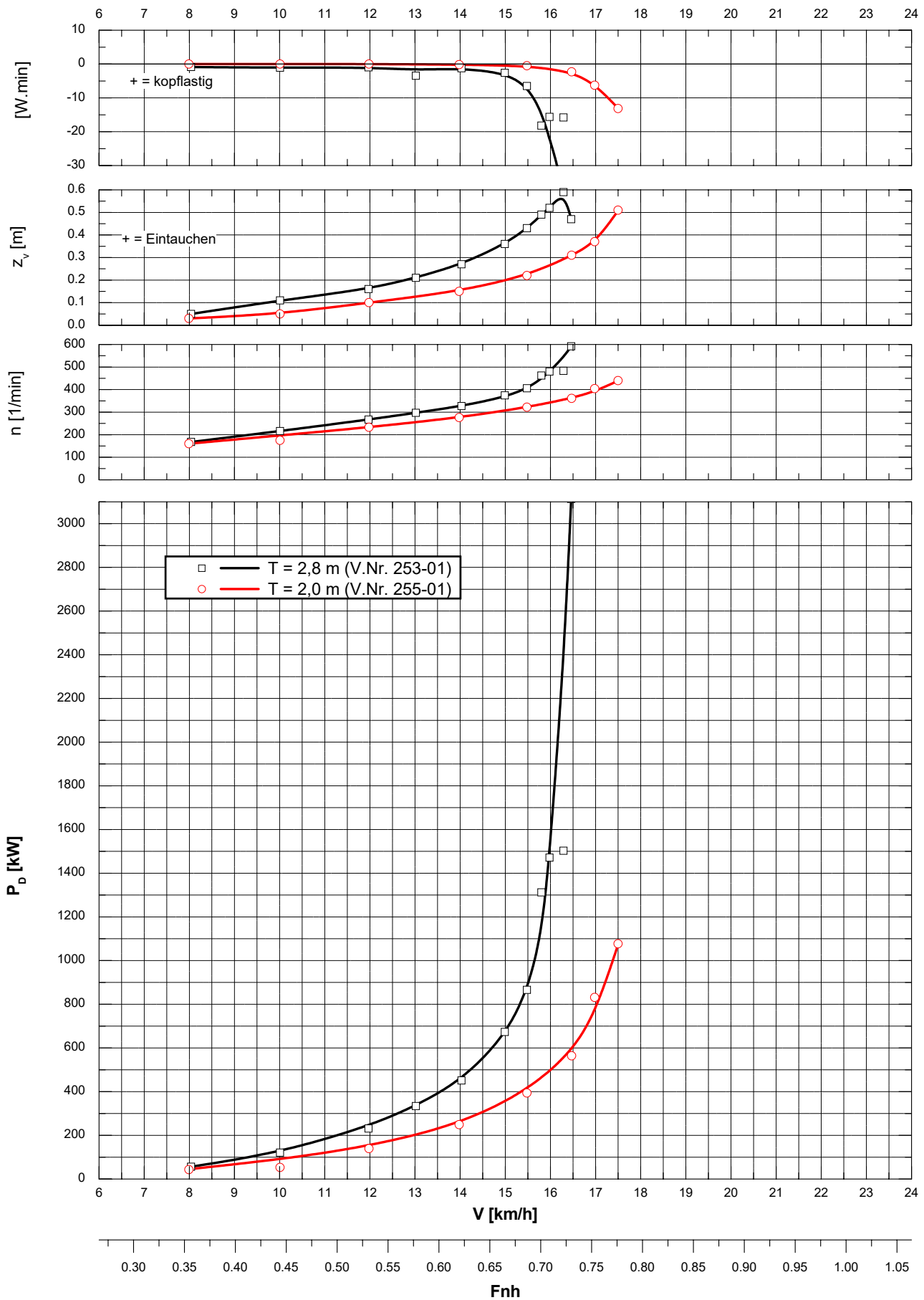
**Variation MR-Bug-Rücklage - Widerstand -
Spezifischer Widerstand**
Semikat. (Kanalschiff, Formvar.1), $L_{OA} = 85,0$ m; $B_{SR} = 2,85$ m
MR-Bug: Typ Euro-Leichter
 $h = 4,0$ m ; $h_{MR} = 0,5$ m ; $T = 2,8$ m
seitl. unbegr. Fahrwasser
Blatt 2 von 2



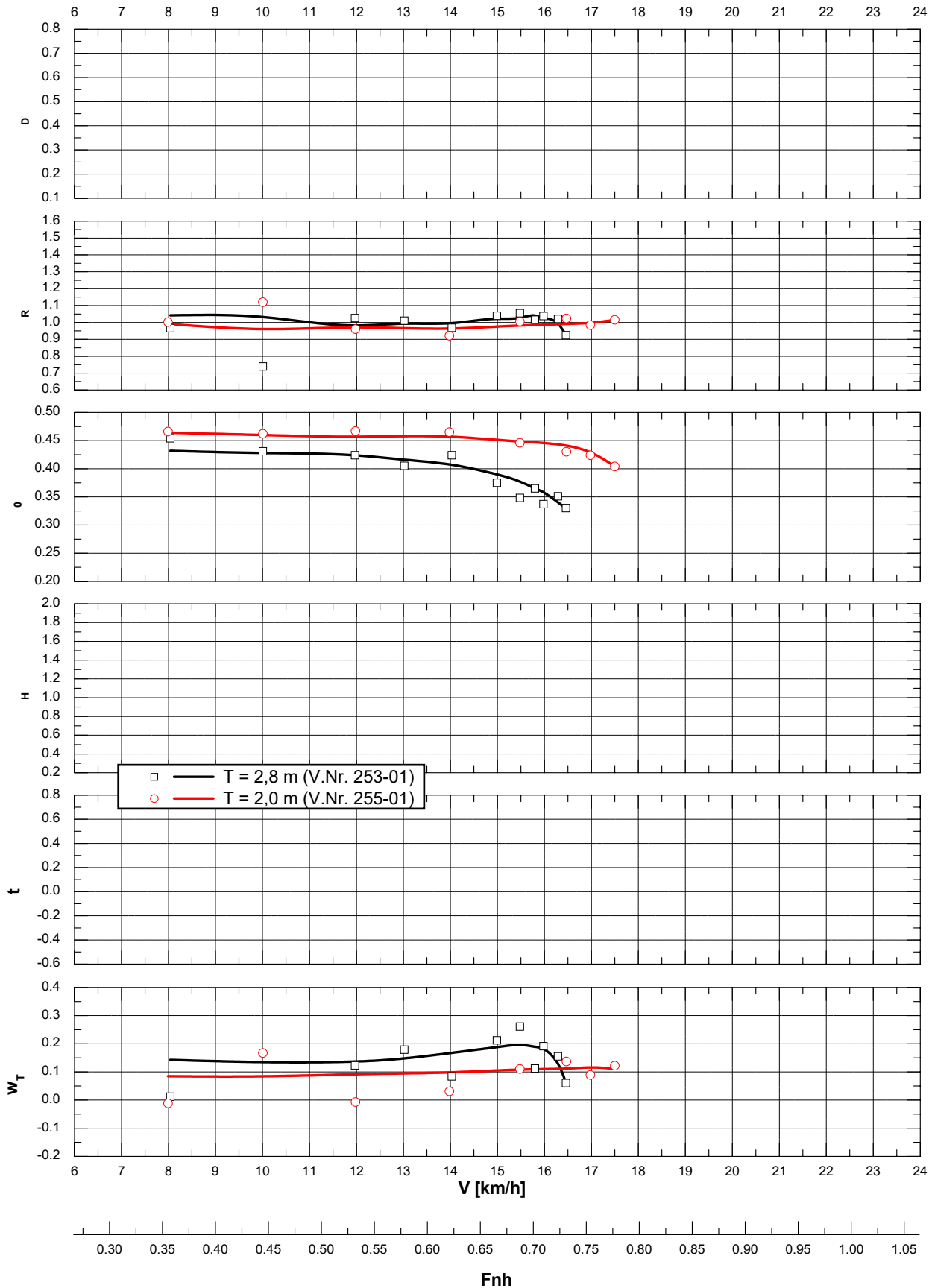
Propulsion - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 60,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 4,0 \text{ m}$
 seitl. unbegr. Fahrwasser

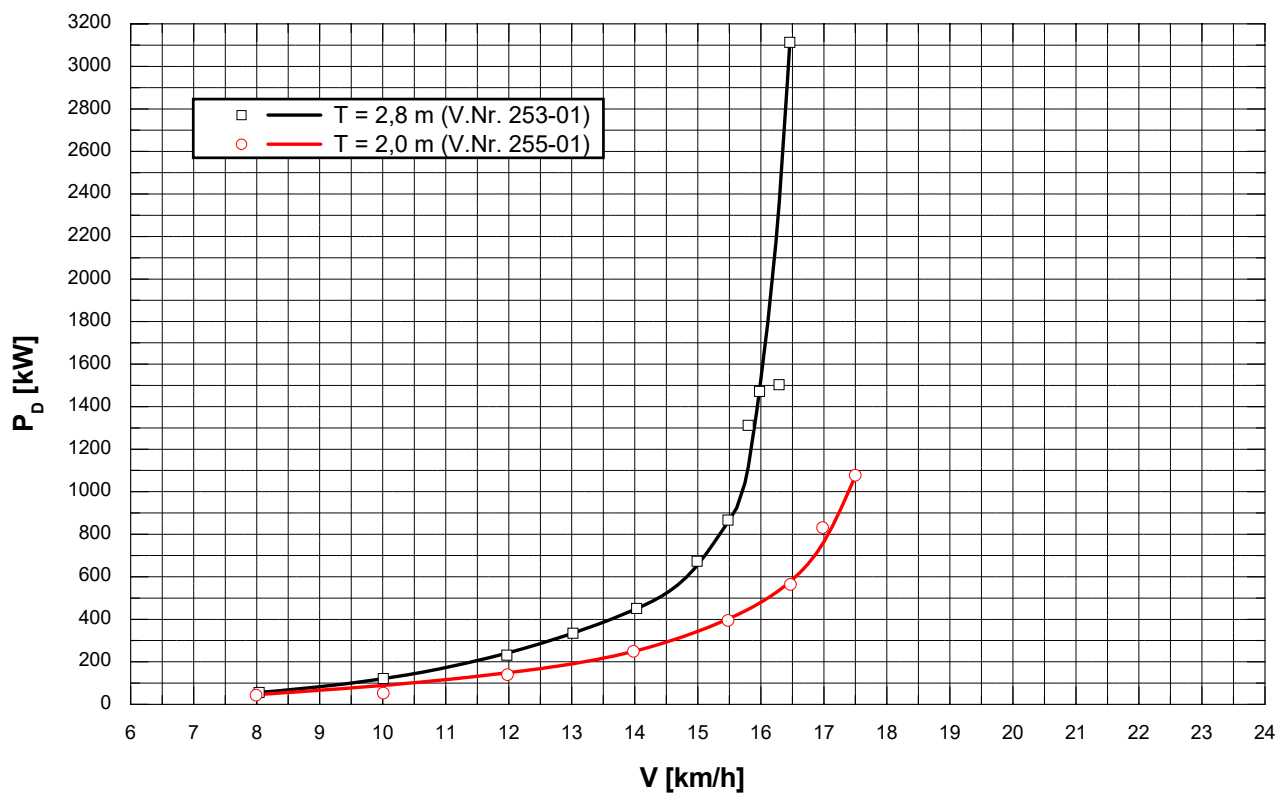
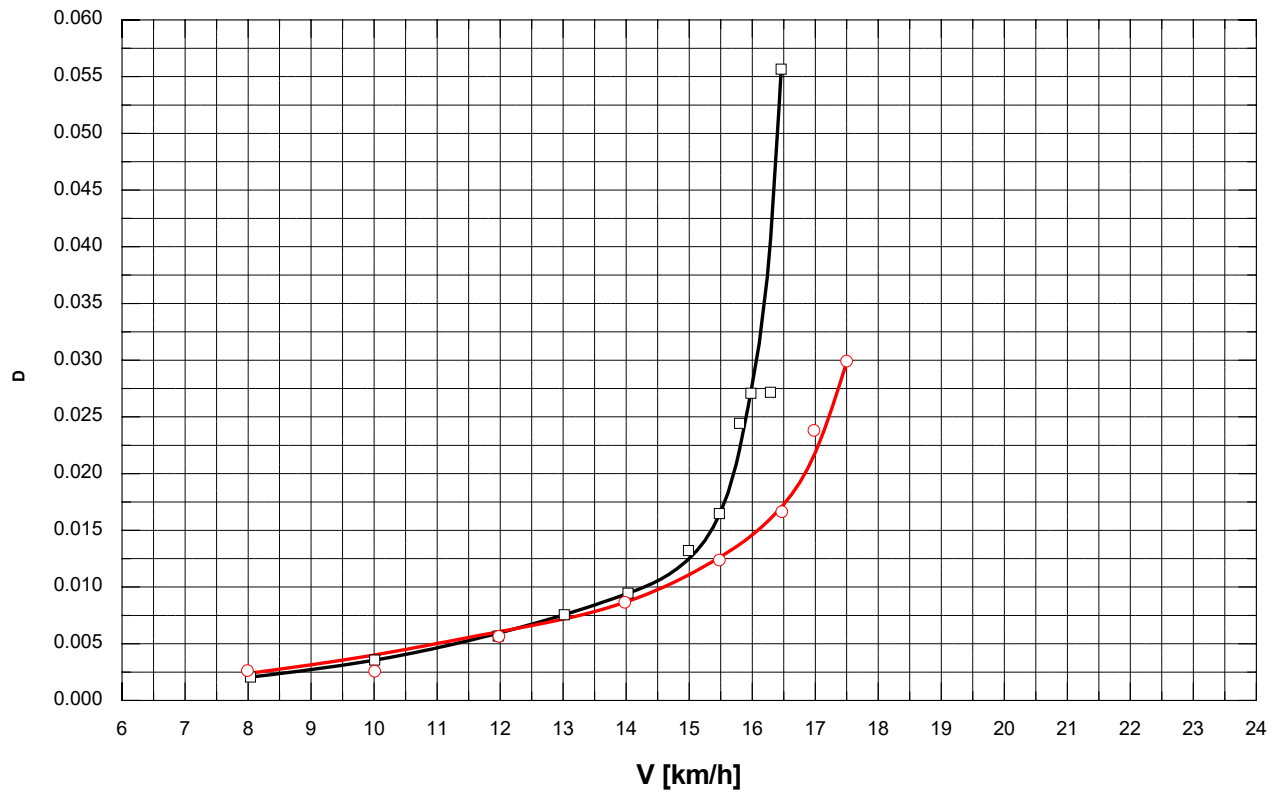
Blatt 1 von 3



Propulsion - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 60,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$
 seittl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 3



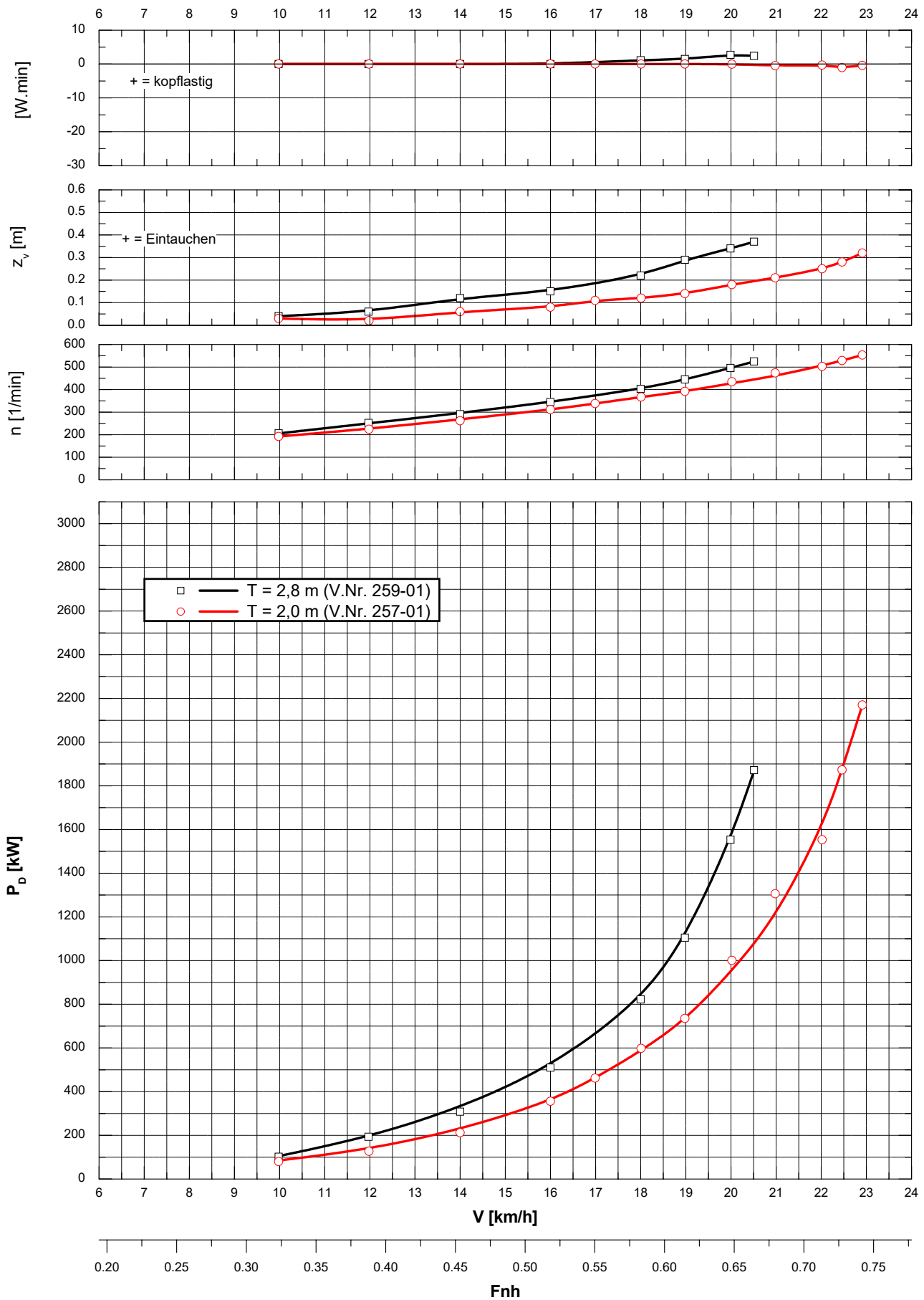
Propulsion - Systematische Versuche -
Spezifische Leistung
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 60,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$
 seilt. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 3 von 3



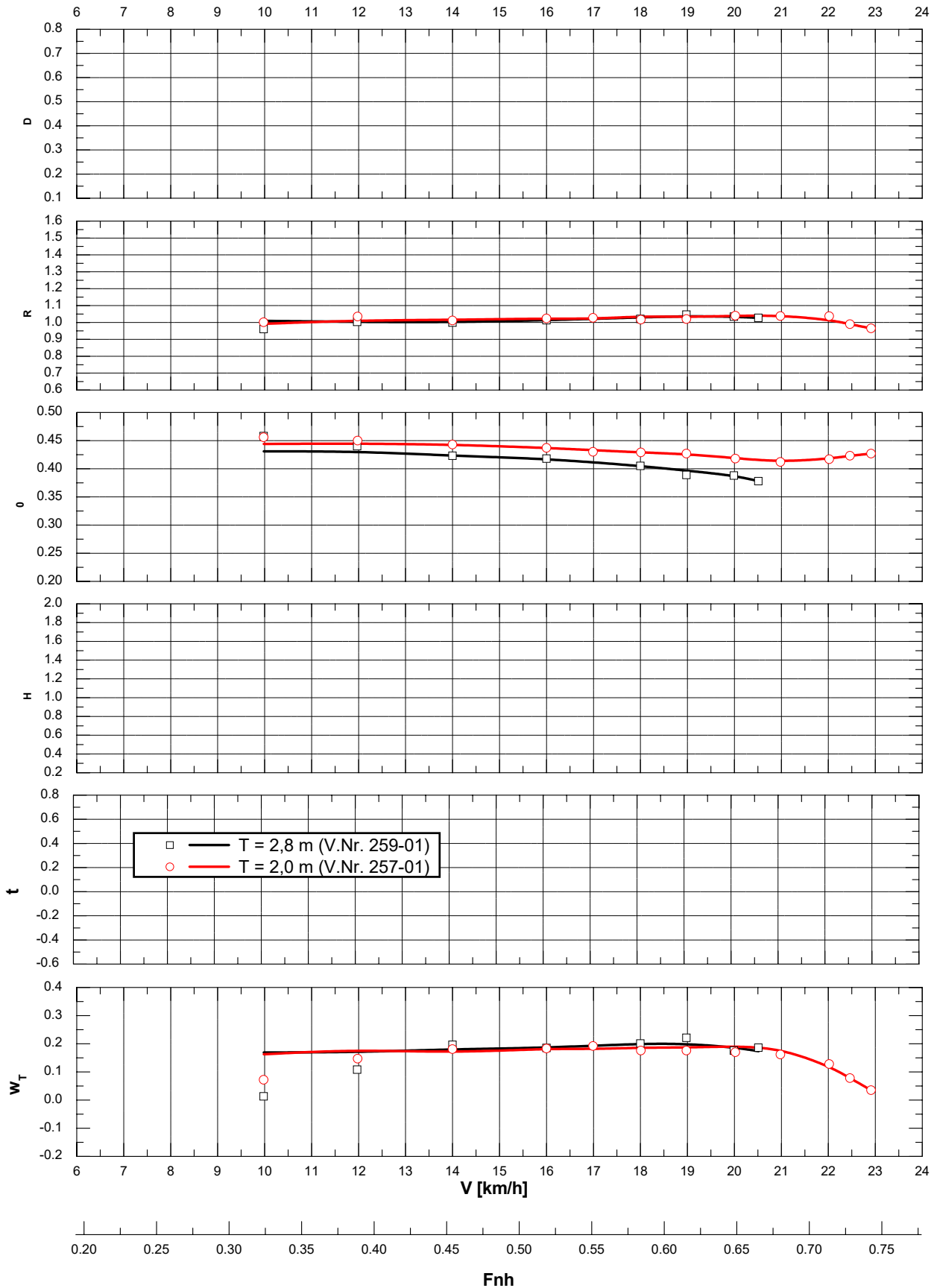
Propulsion - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 60,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 7,5 \text{ m}$
 seittl. unbegr. Fahrwasser

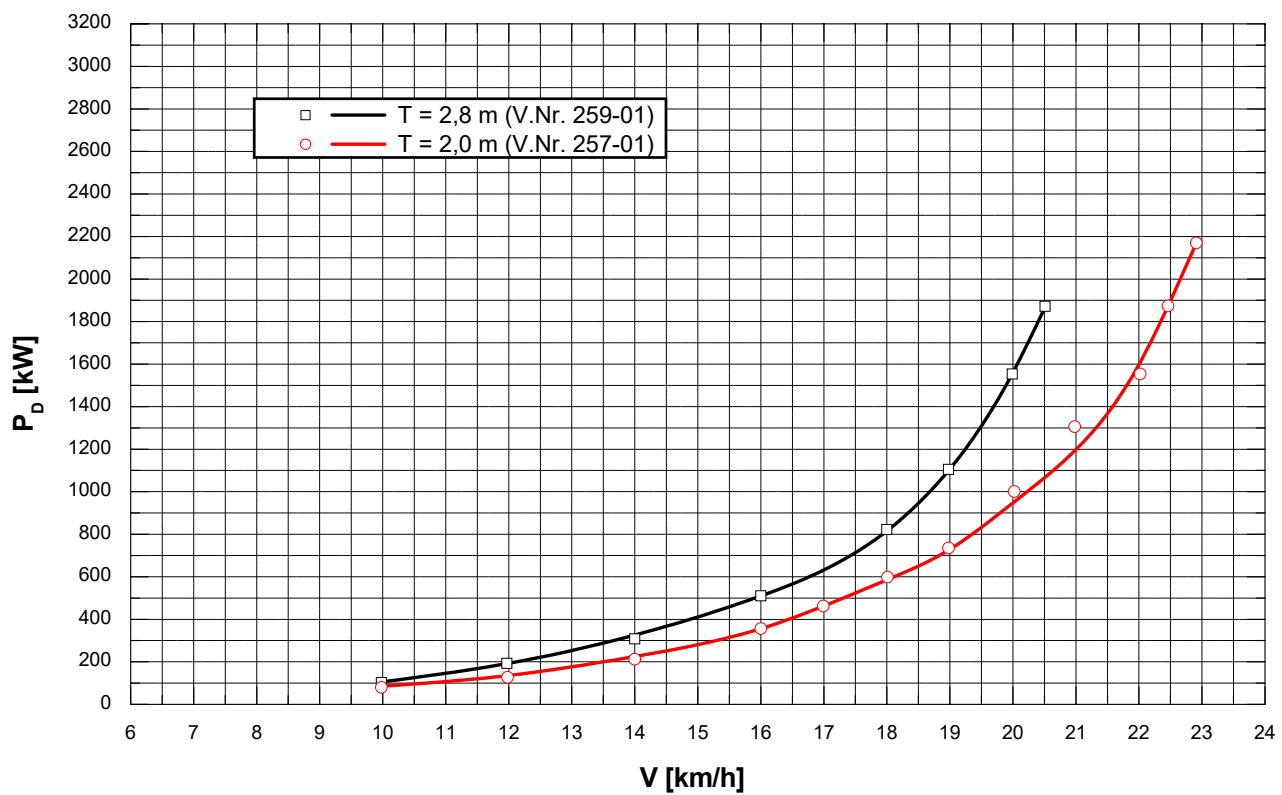
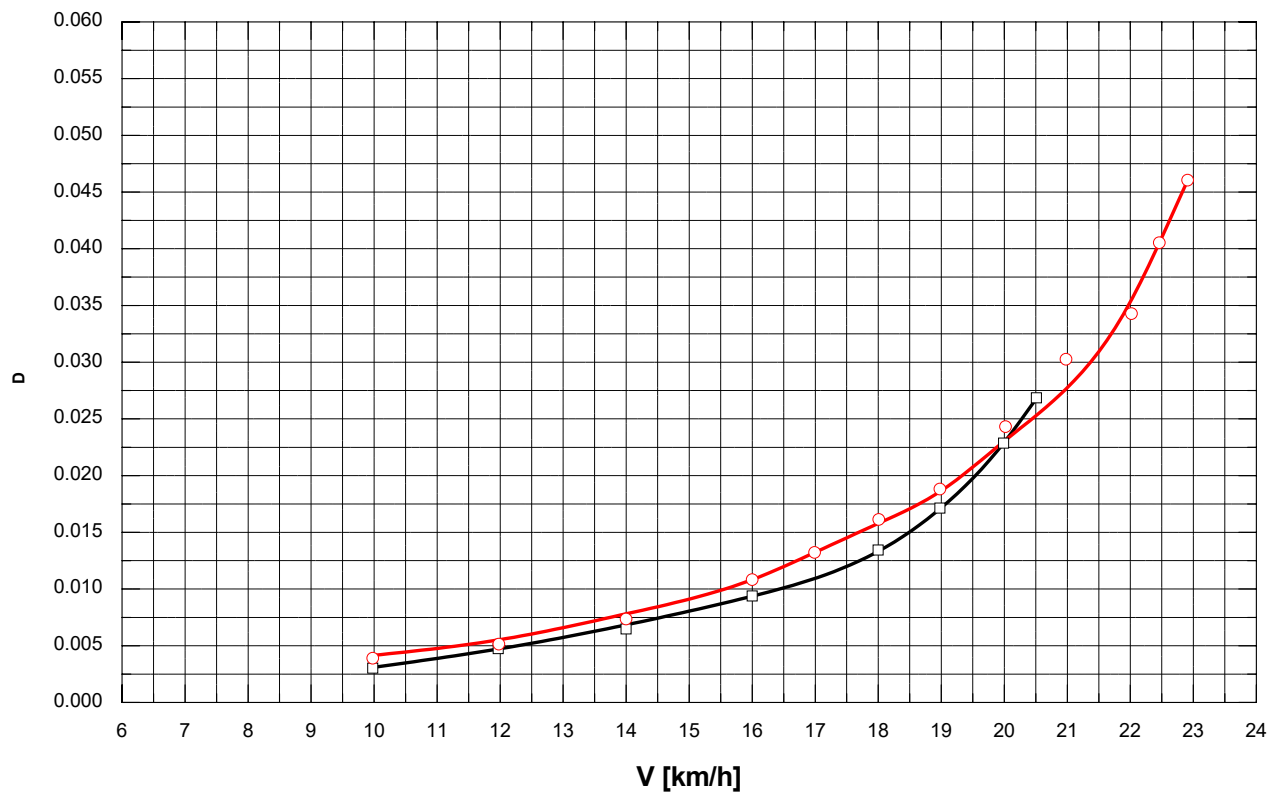
Blatt 1 von 3



Propulsion - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 60,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 7,5 \text{ m}$
 seittl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 3



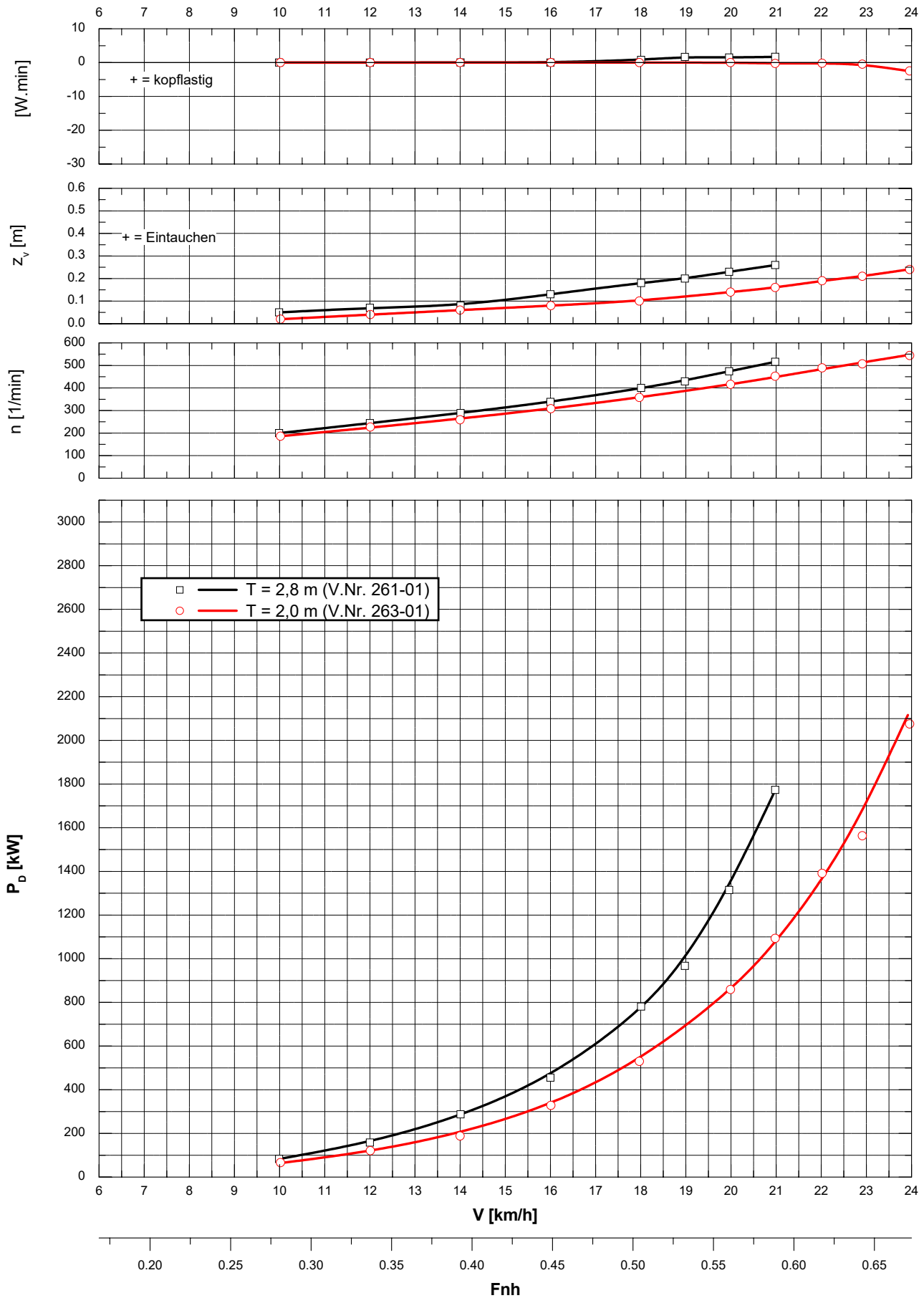
Propulsion - Systematische Versuche -
Spezifische Leistung
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 60,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 7,5 \text{ m}$
 seith. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 3 von 3



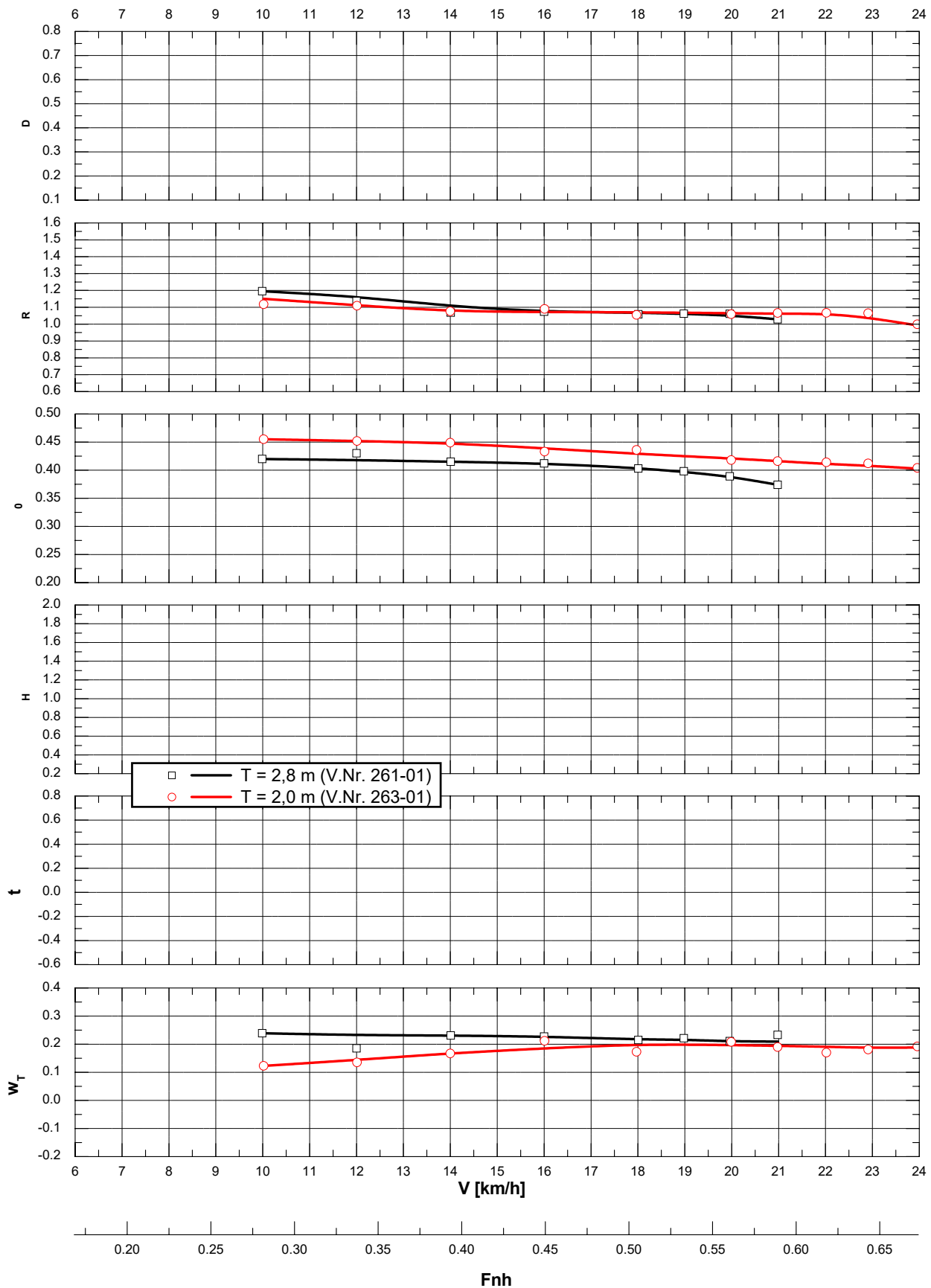
Propulsion - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 60,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 10,0 \text{ m}$
 seitl. unbegr. Fahrwasser

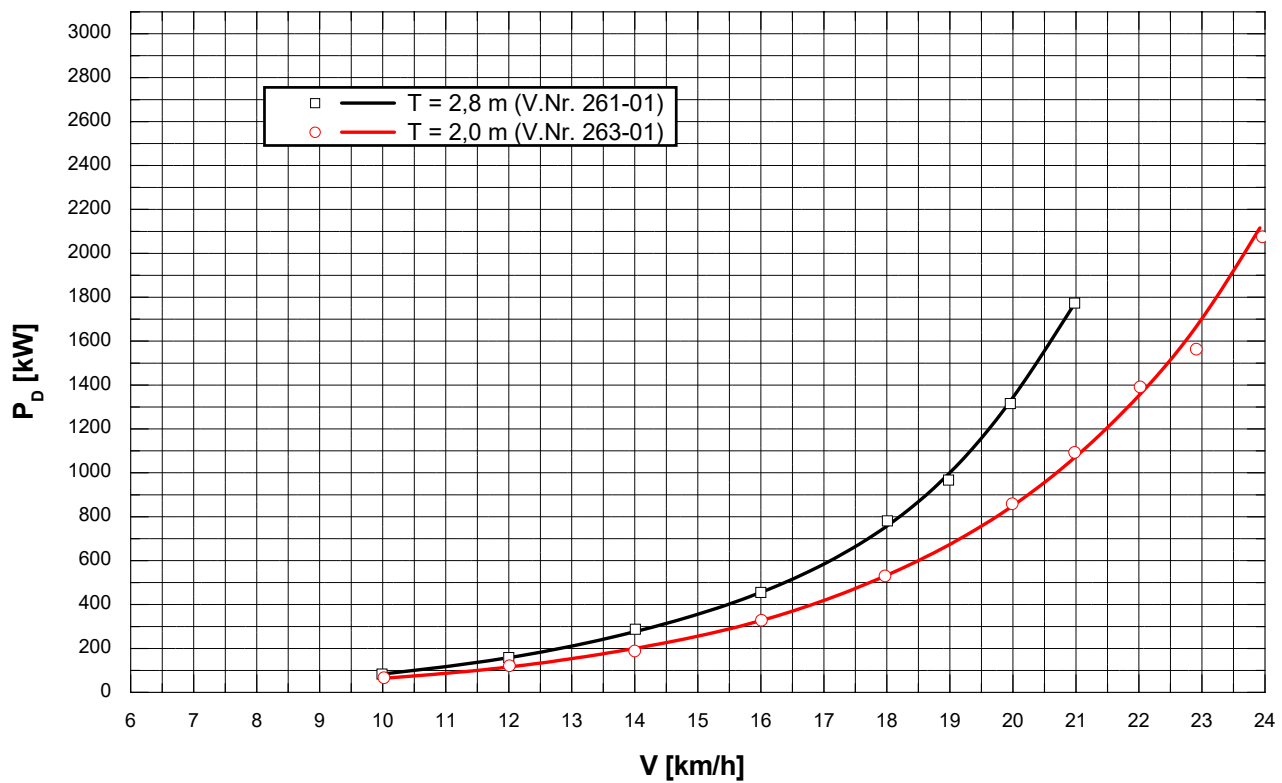
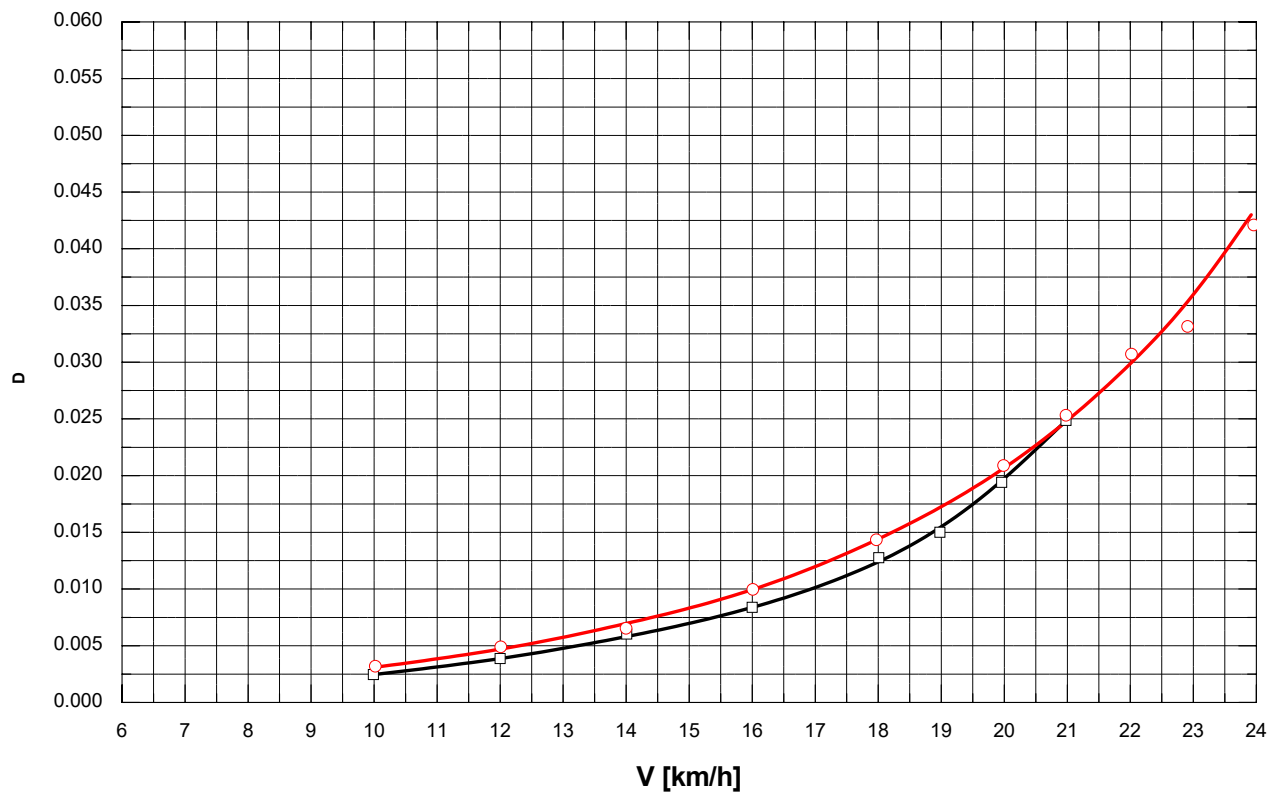
Blatt 1 von 3



Propulsion - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 60,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 10,0 \text{ m}$
 seitl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 3



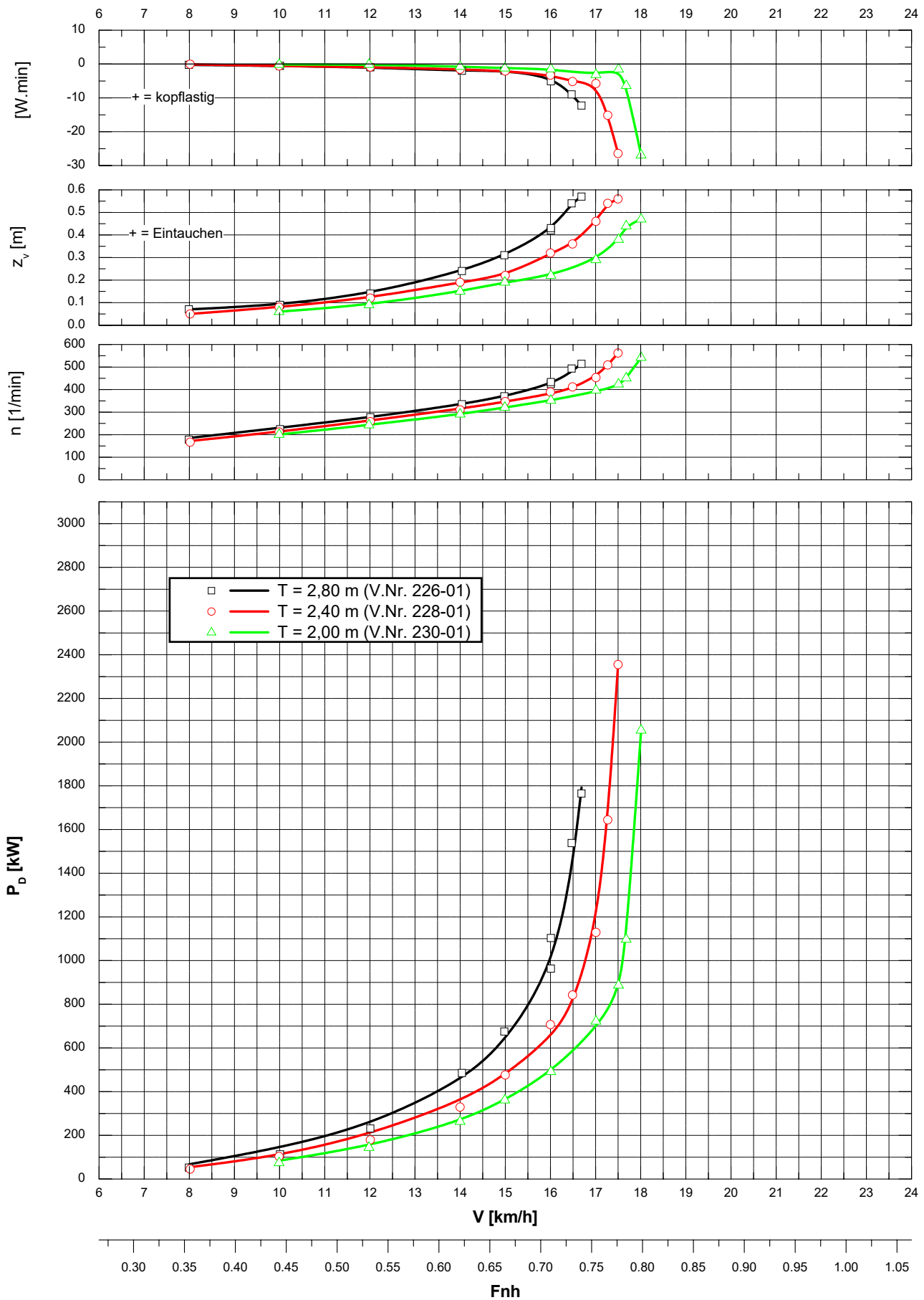
Propulsion - Systematische Versuche -
Spezifische Leistung
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 60,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 10,0 \text{ m}$
 seiti. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 3 von 3



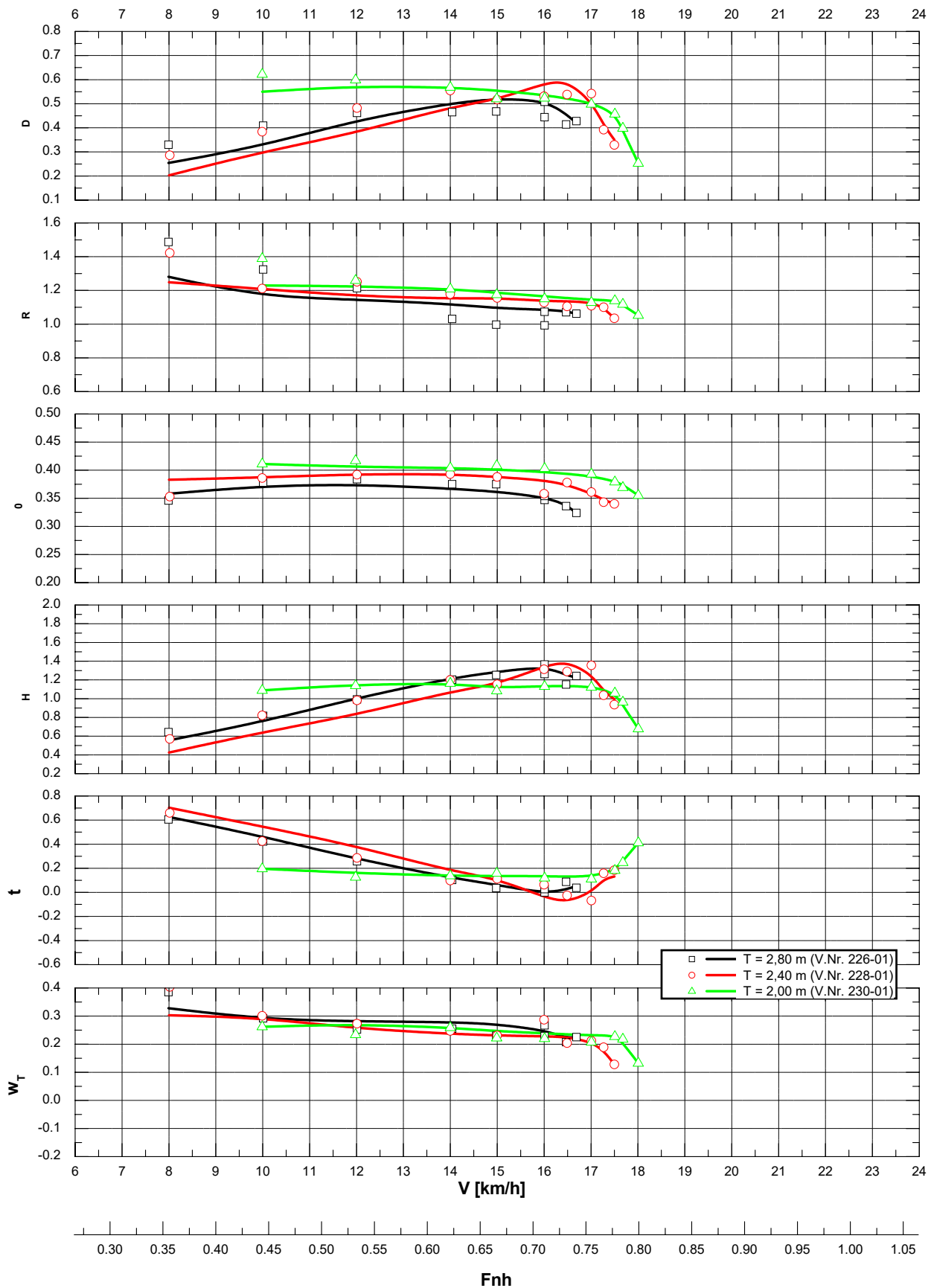
Propulsion - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 4,0 \text{ m}$
 seitl. unbegr. Fahrwasser

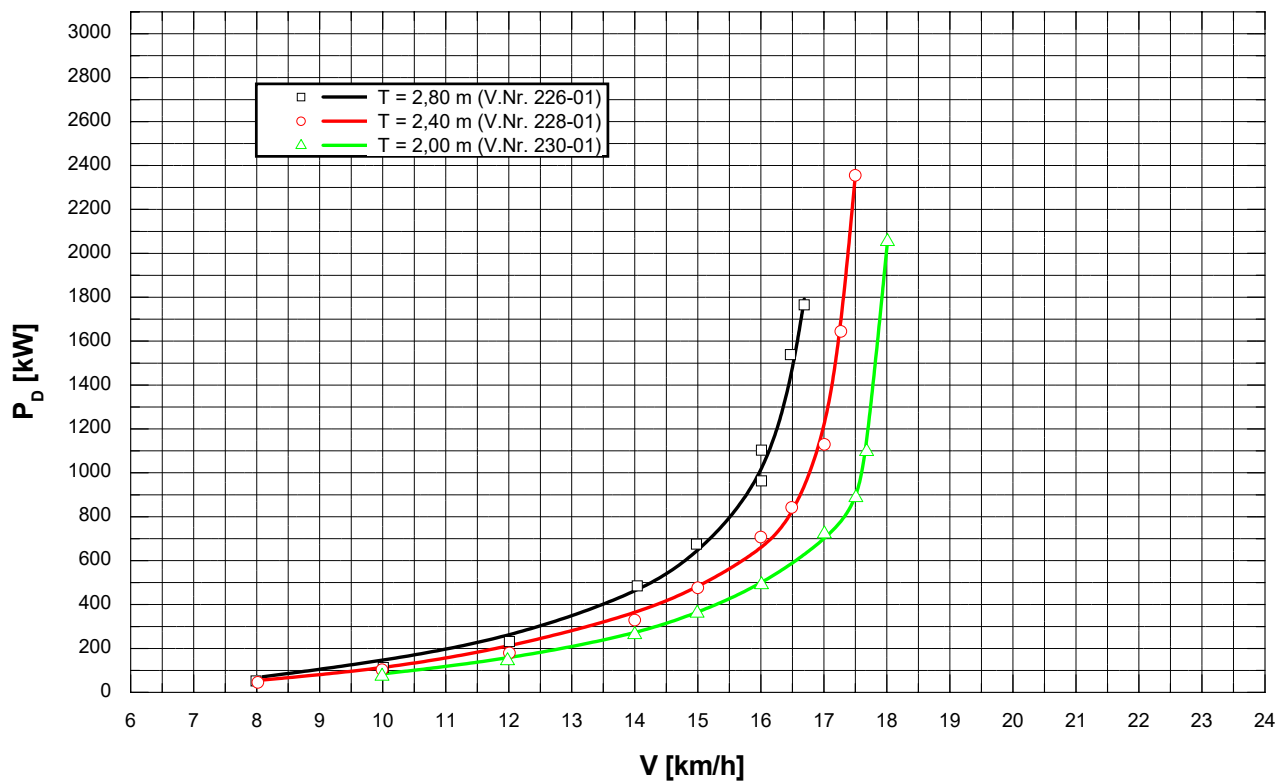
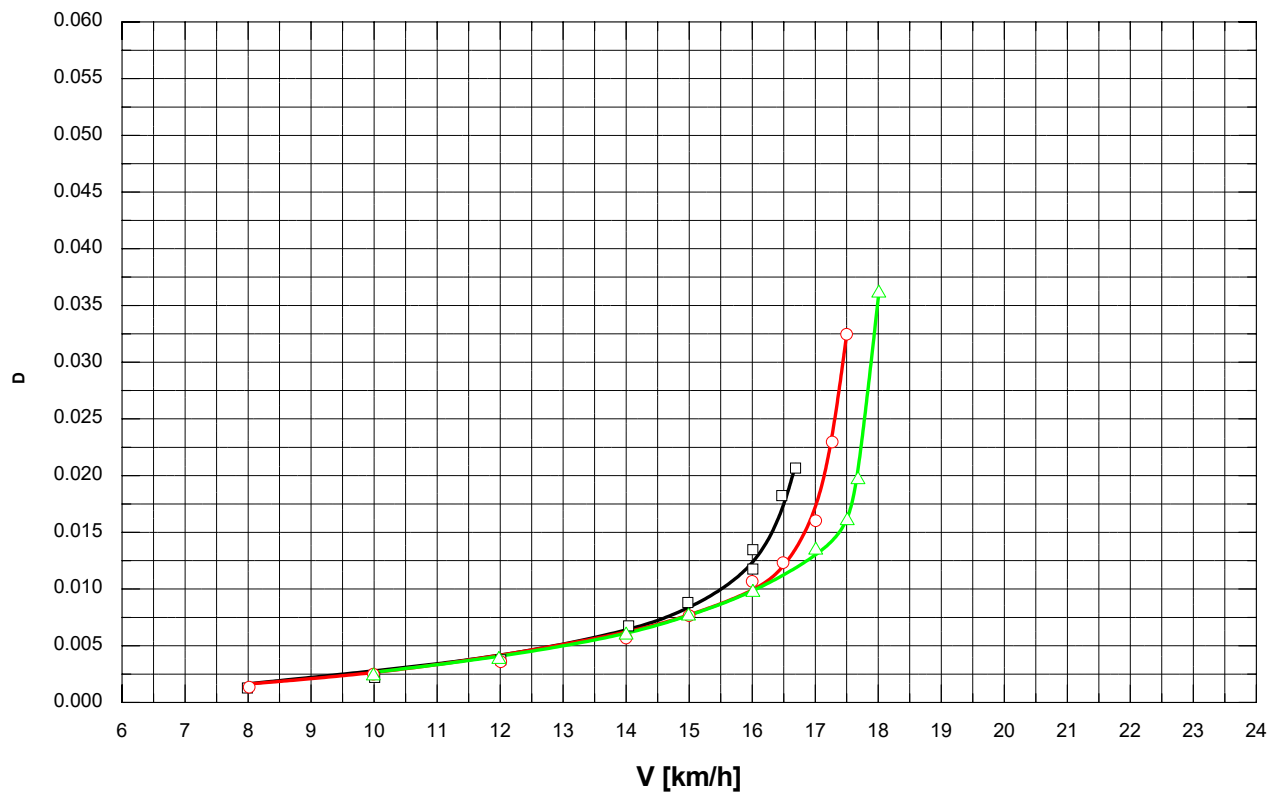
Blatt 1 von 3



Propulsion - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanal-schiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$
 seittl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 3

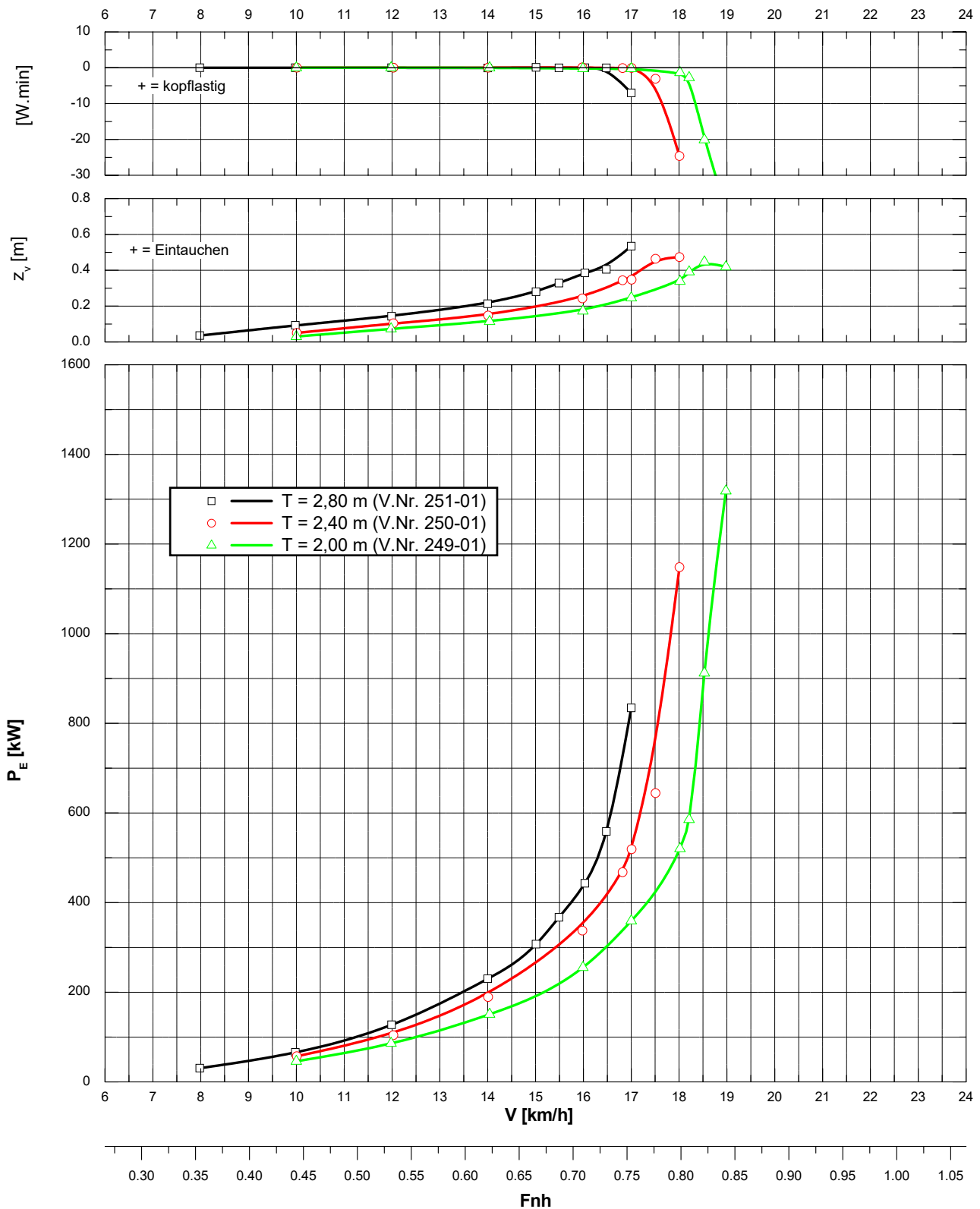


Propulsion - Systematische Versuche -
Spezifische Leistung
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$
 seitl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 3 von 3

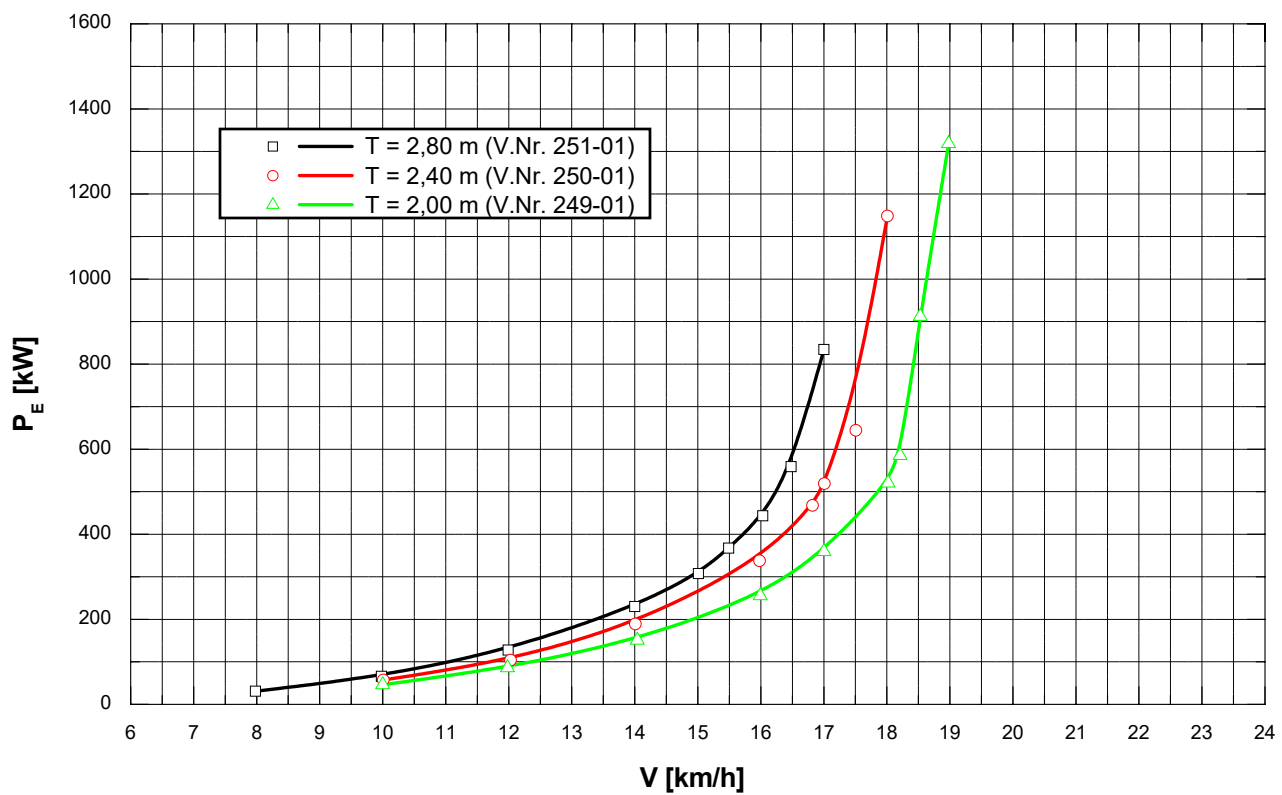
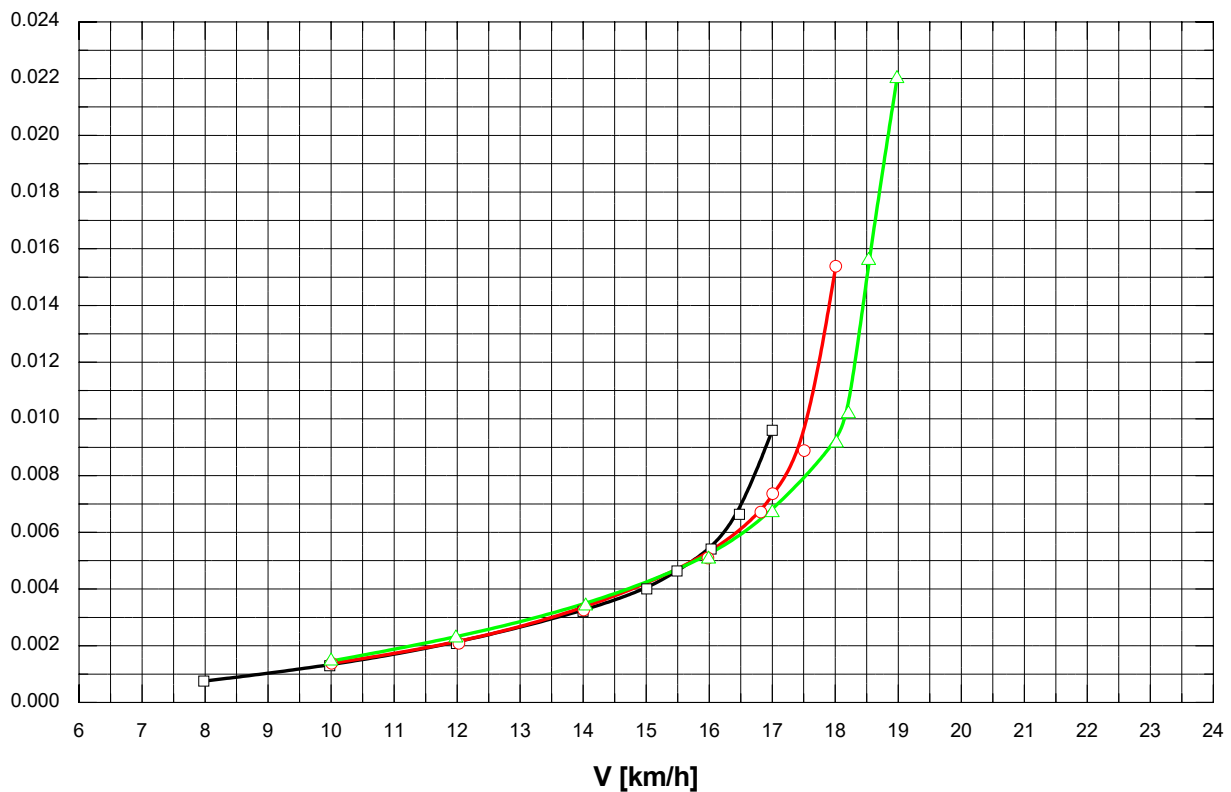


Widerstand - Systematische Versuche -
Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 4,0 \text{ m}$
seitl. unbegr. Fahrwasser
Blatt 1 von 2



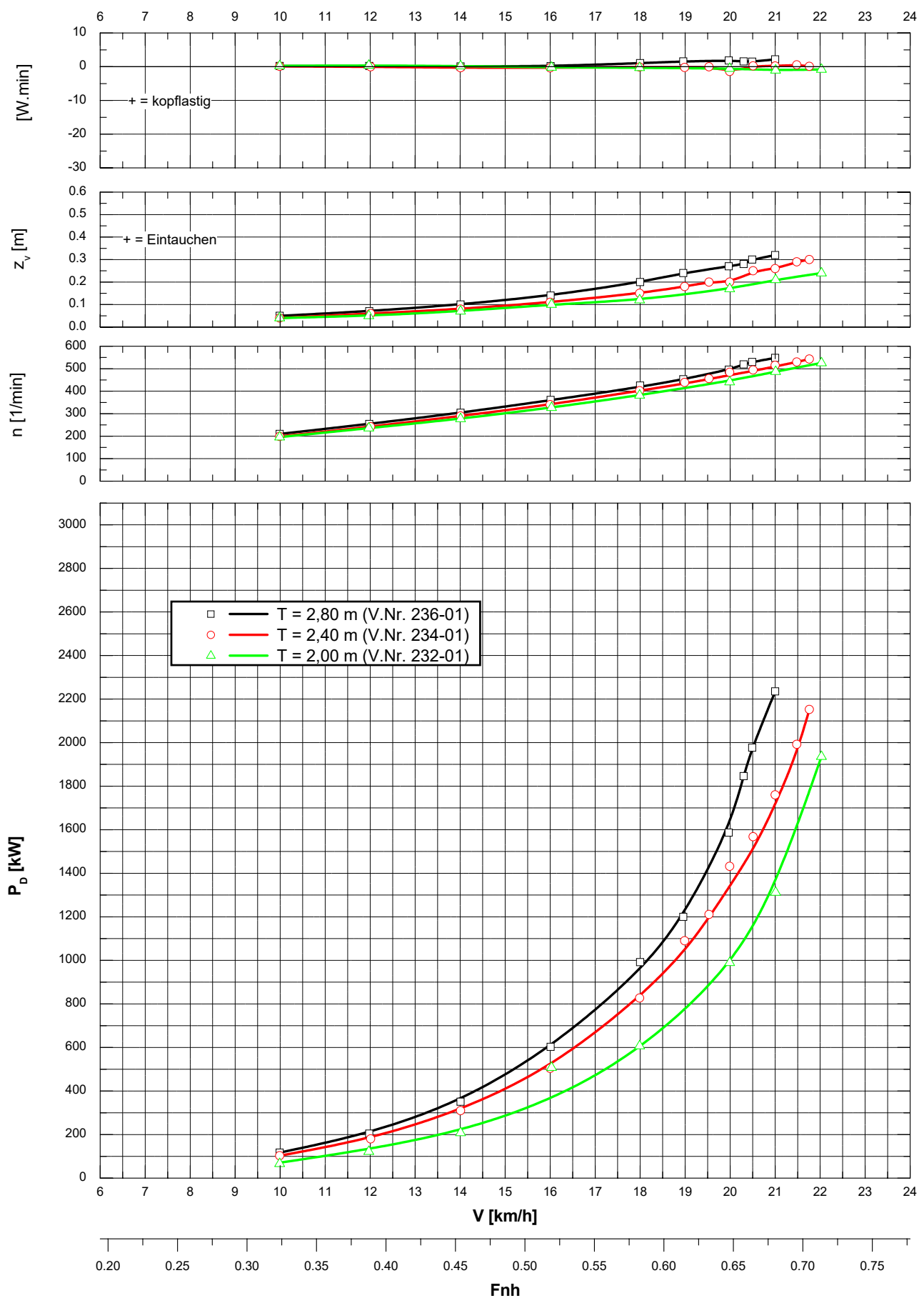
Widerstand - Systematische Versuche -
Spezifischer Widerstand
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$
 seiltl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 2



Propulsion - Systematische Versuche -
Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

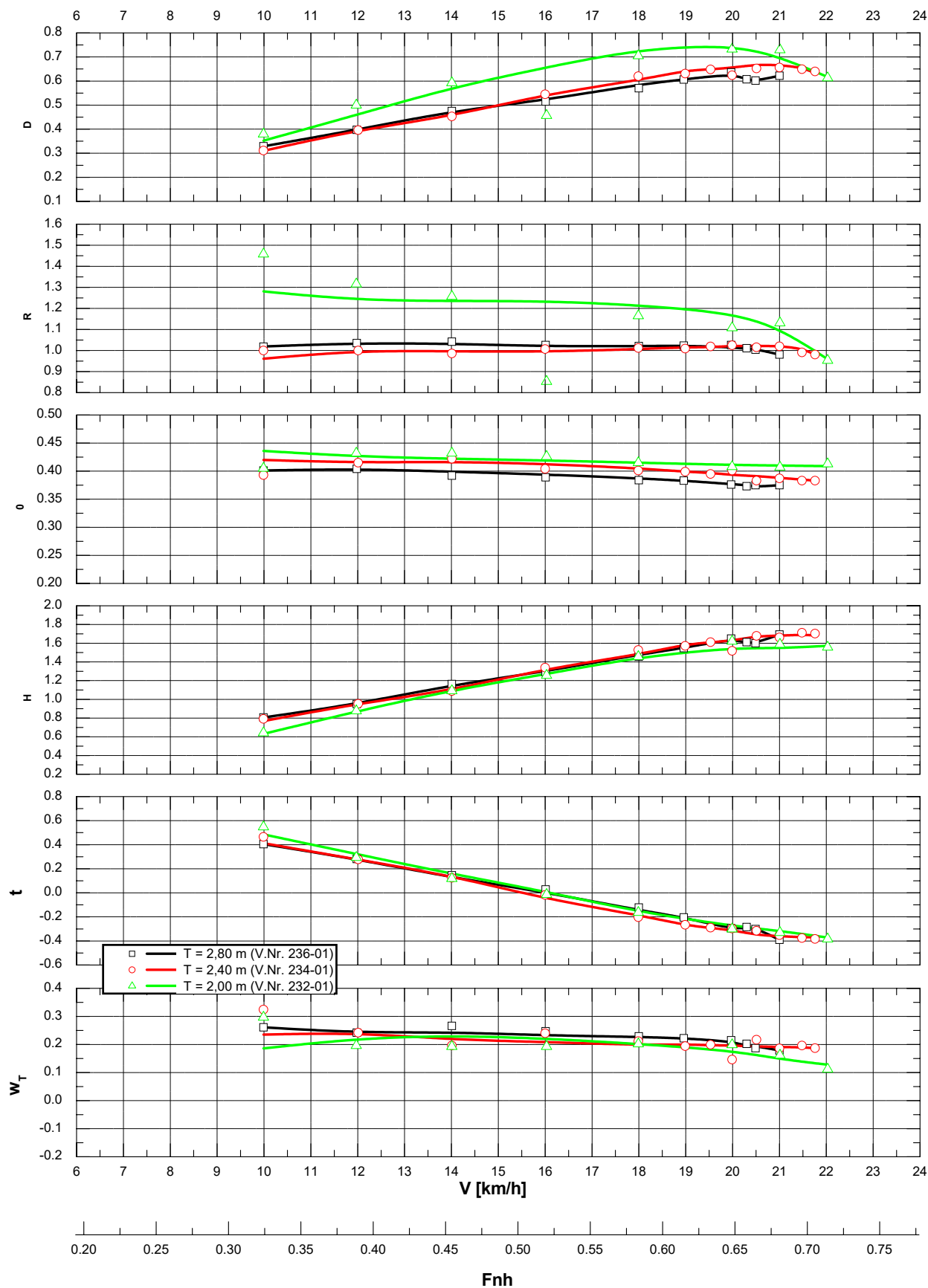
$h = 7,5 \text{ m}$
seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 1 von 3

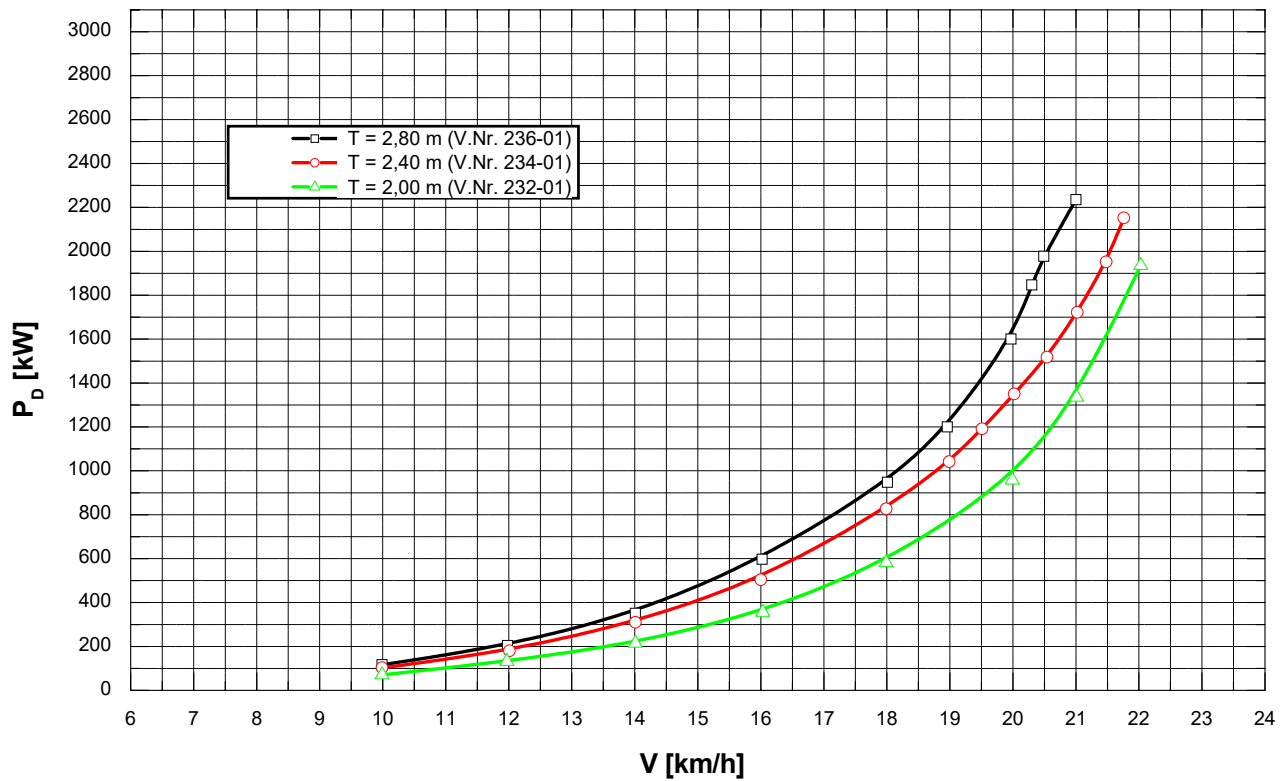
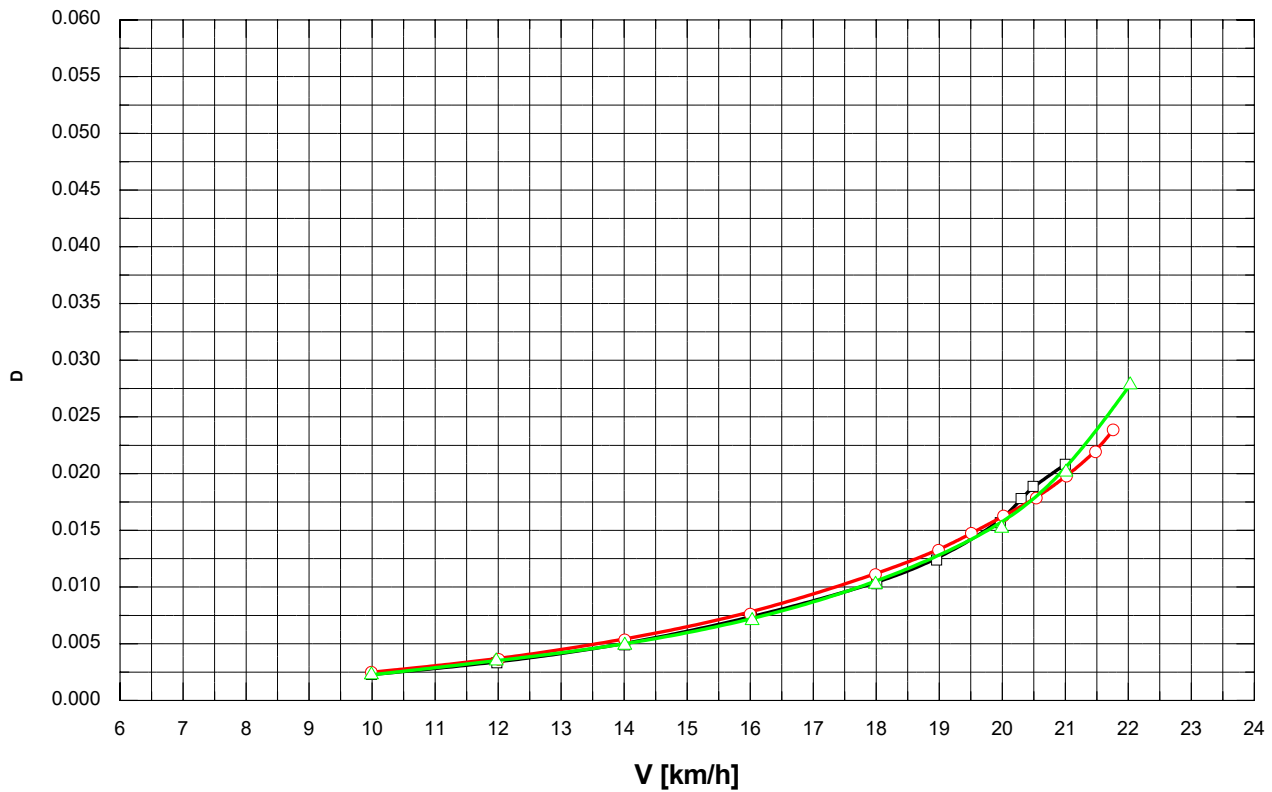


Propulsion - Systematische Versuche -
Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 7,5 \text{ m}$
seitl. unbegr. Fahrwasser
Blatt 2 von 3



Propulsion - Systematische Versuche -
Spezifische Leistung
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 7,5 \text{ m}$
 seilt. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 3 von 3

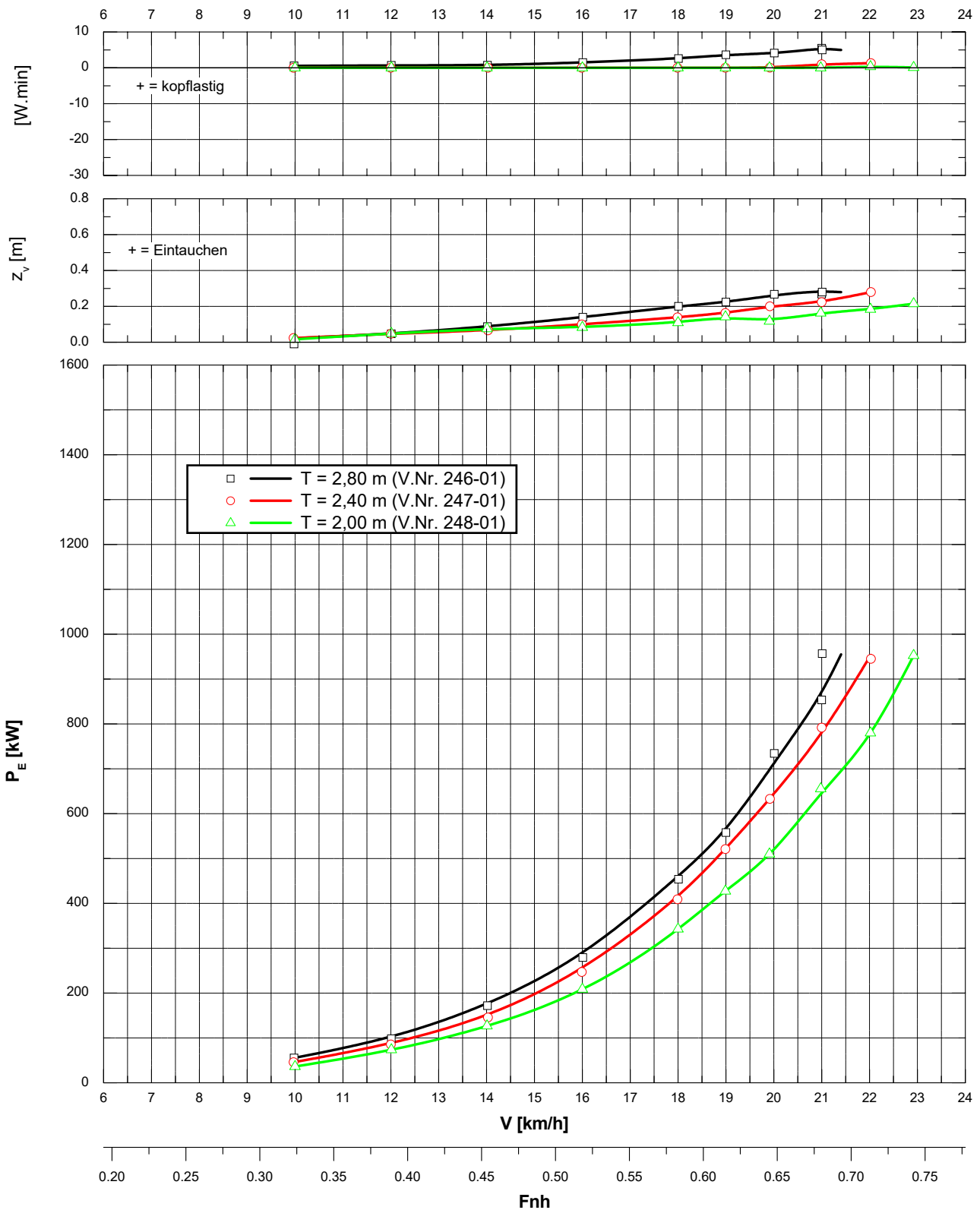


Widerstand - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

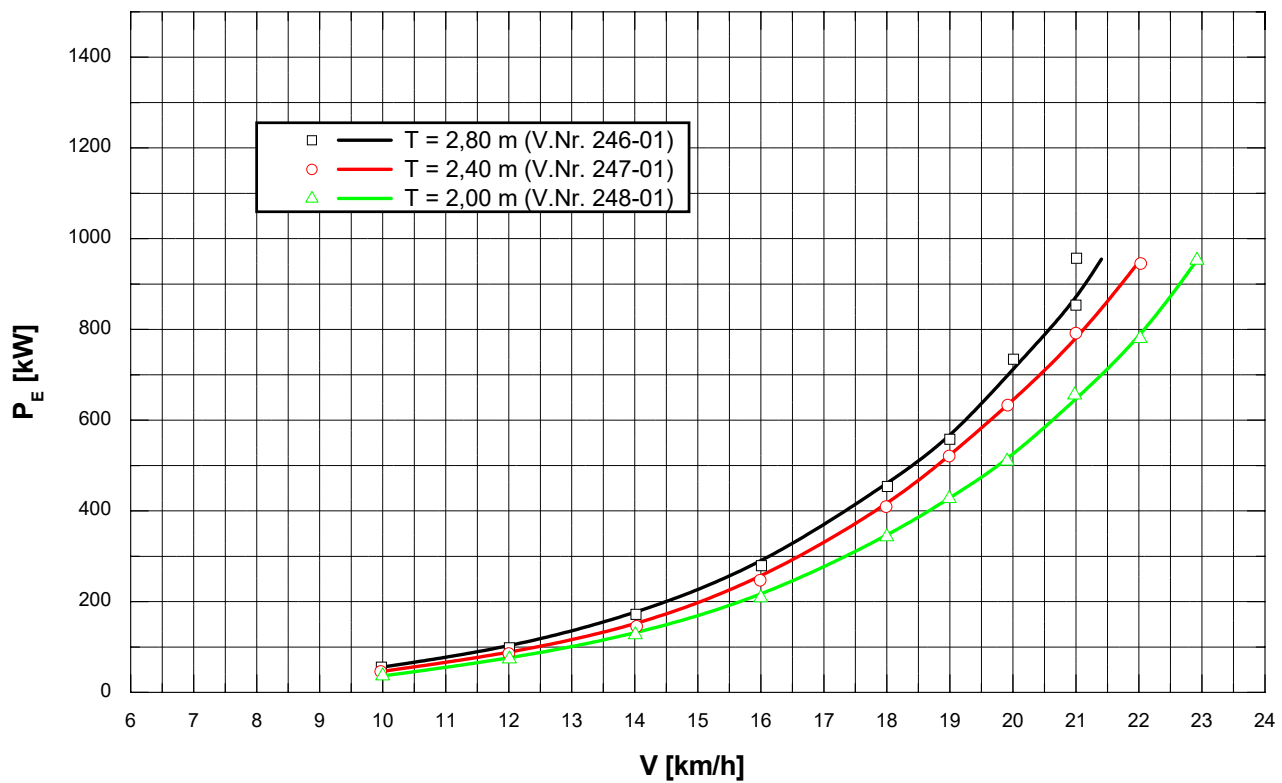
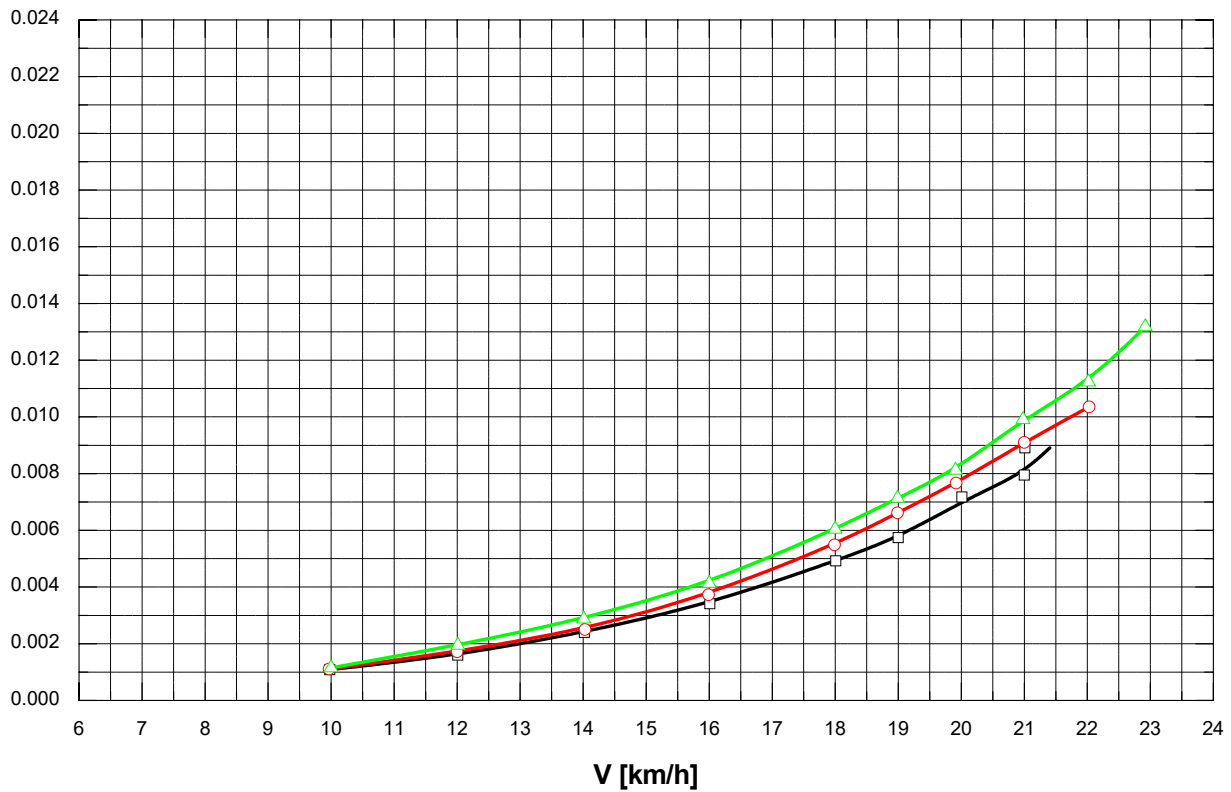
$h = 7,5 \text{ m}$

seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 1 von 2



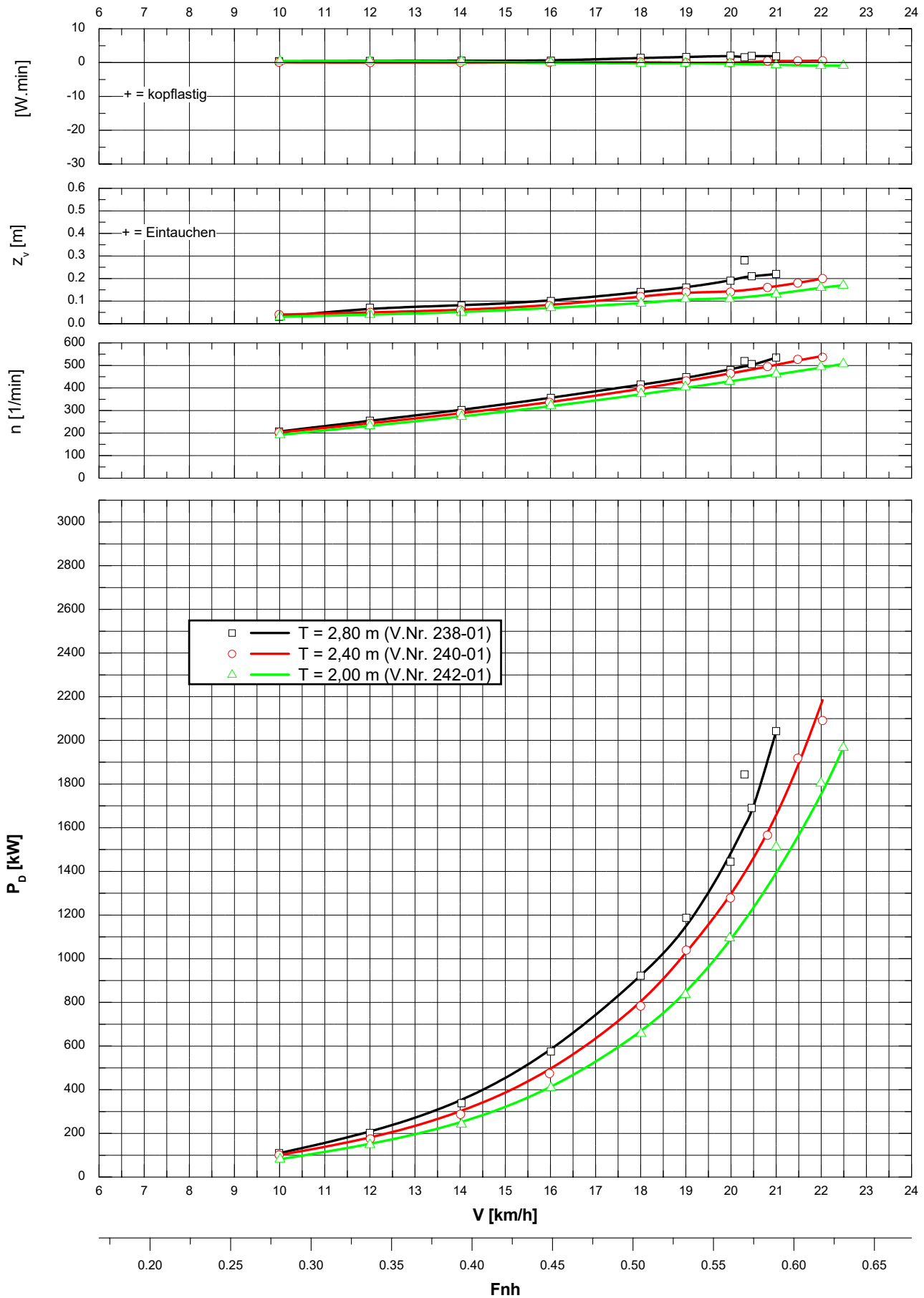
Widerstand - Systematische Versuche -
Spezifischer Widerstand
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 7,5 \text{ m}$
 sertl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 2



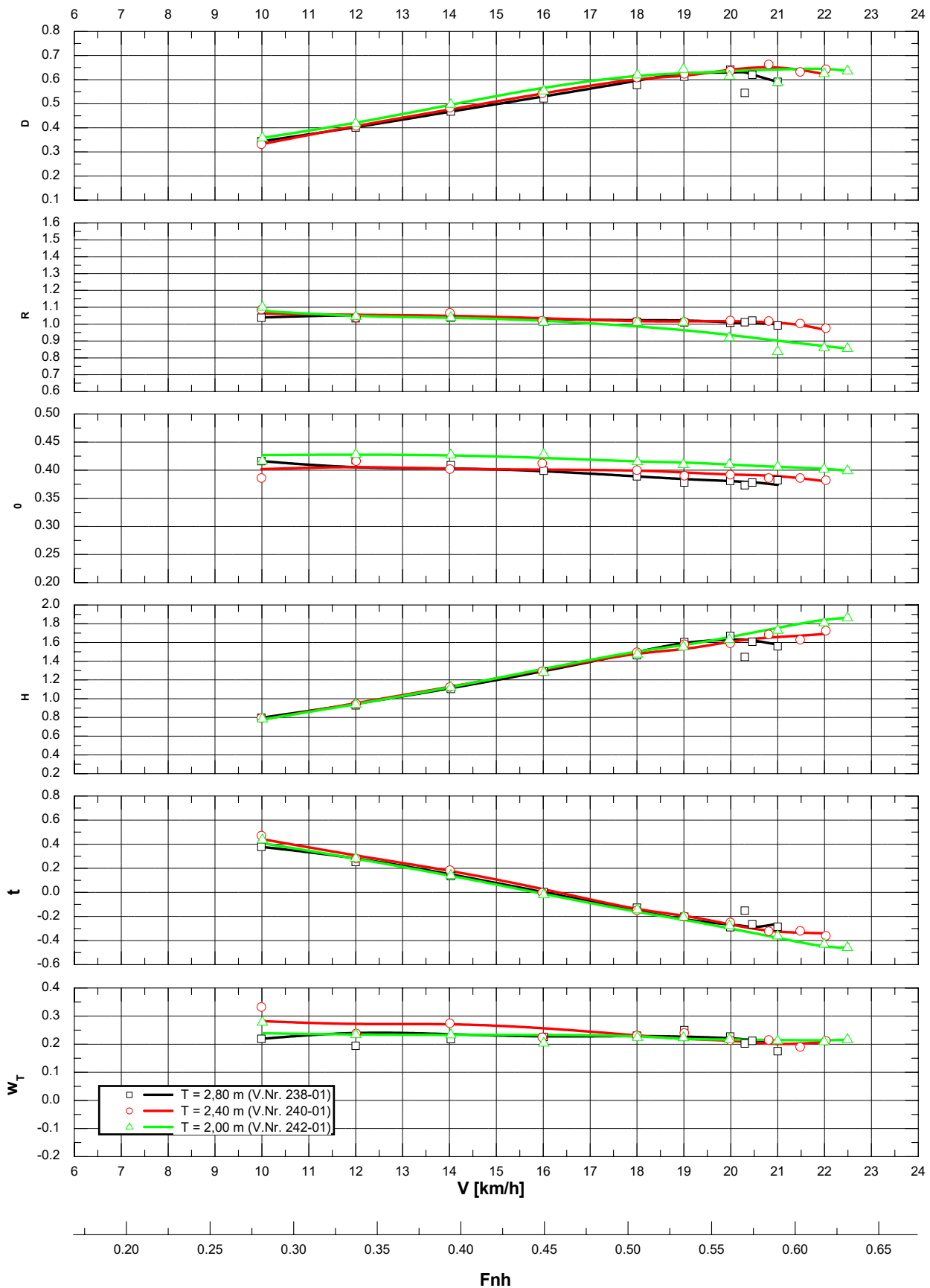
Propulsion - Systematische Versuche -
Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 10,0 \text{ m}$
seitl. unbegr. Fahrwasser

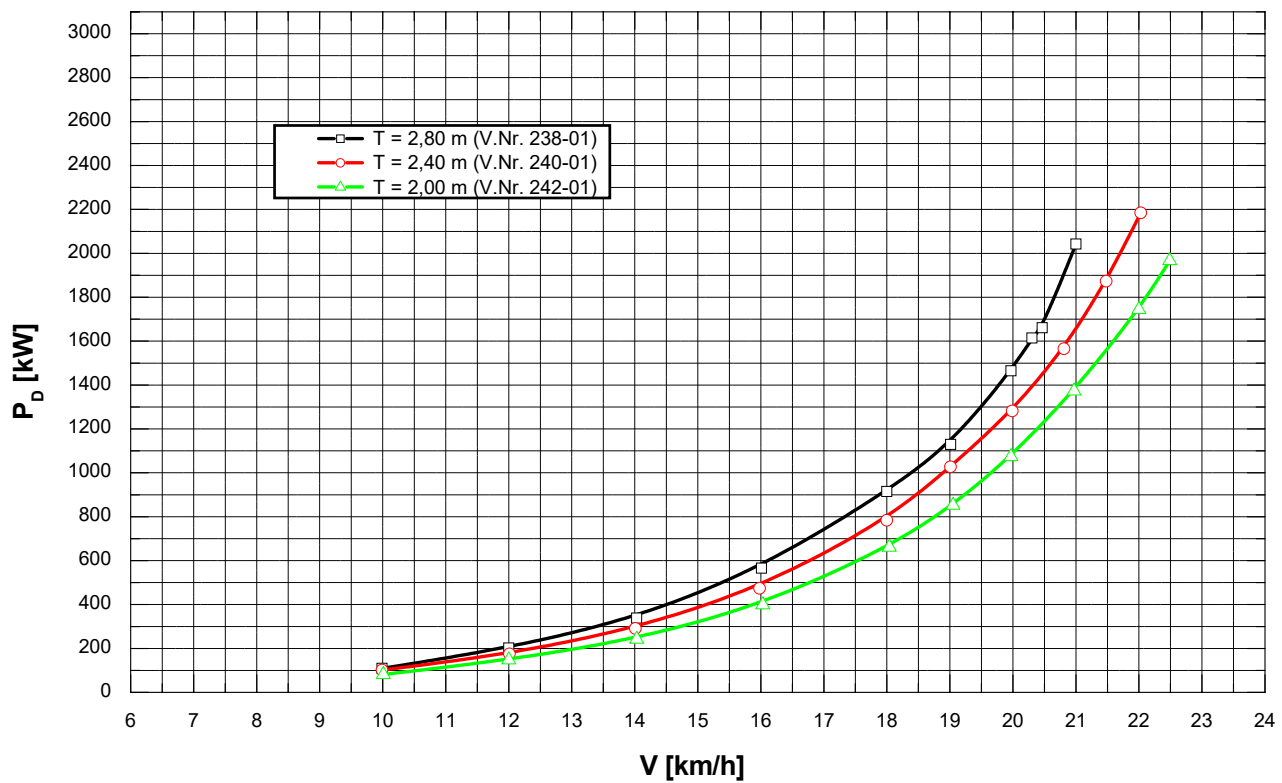
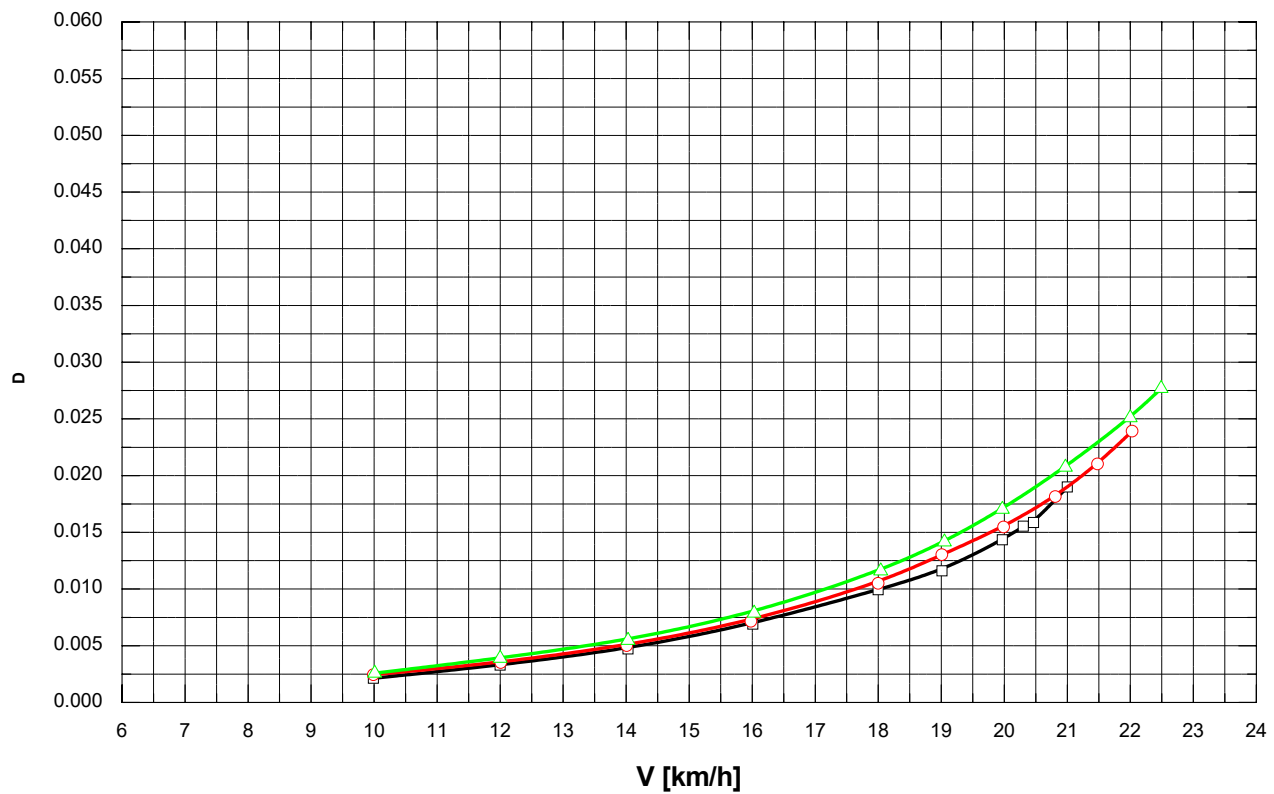
Blatt 1 von 3



Propulsion - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 10,0 \text{ m}$
 seitl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 3

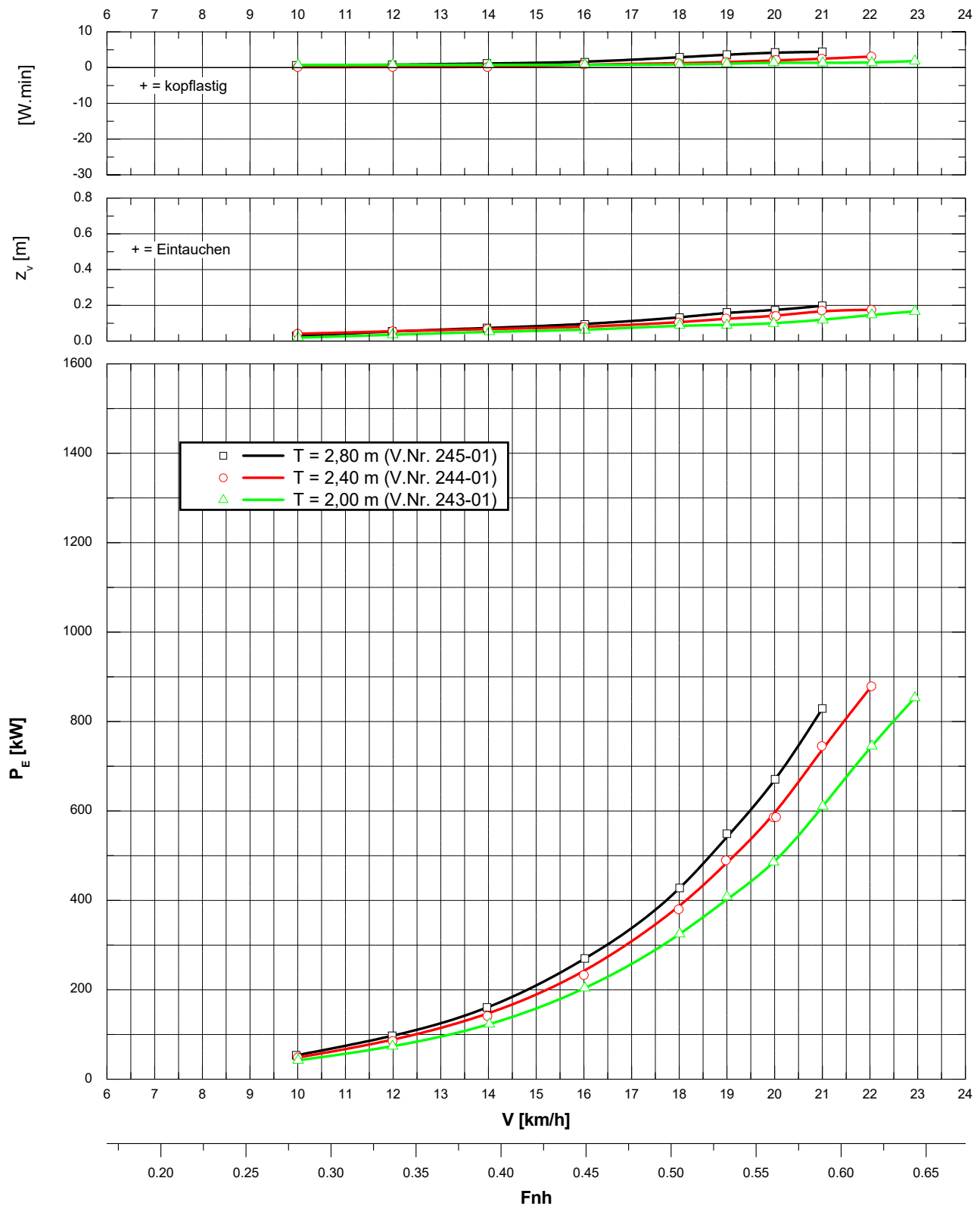


**Propulsion - Systematische Versuche -
Spezifische Leistung**
Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 10,0 \text{ m}$
seitl. unbegr. Fahrwasser
Blatt 3 von 3

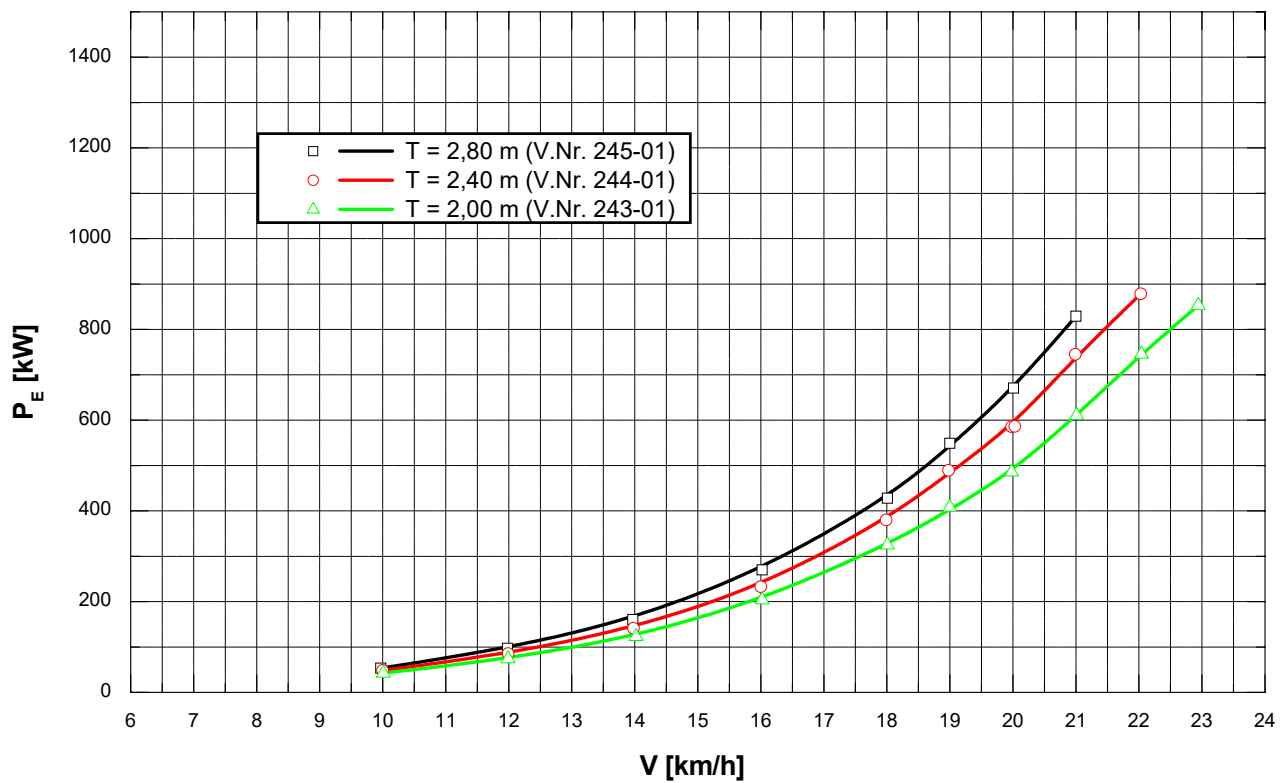
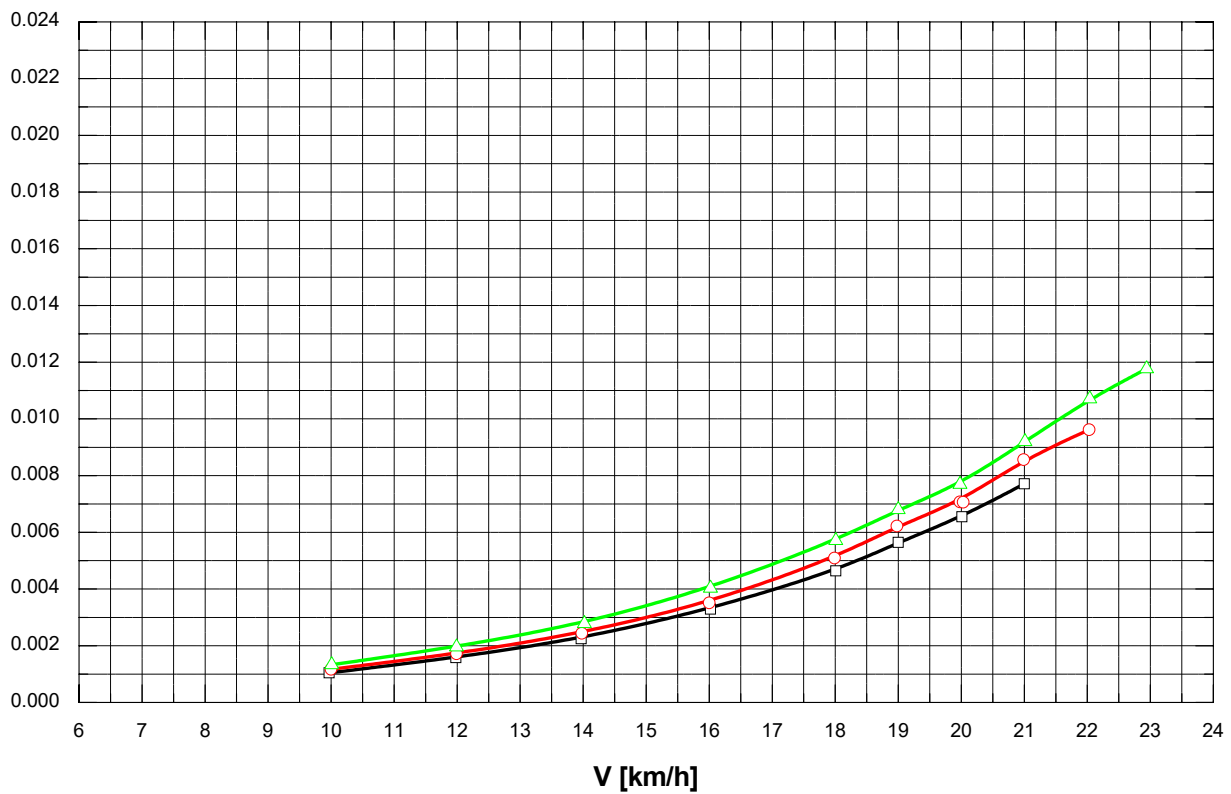


Widerstand - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 10,0 \text{ m}$
 seiti. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 1 von 2



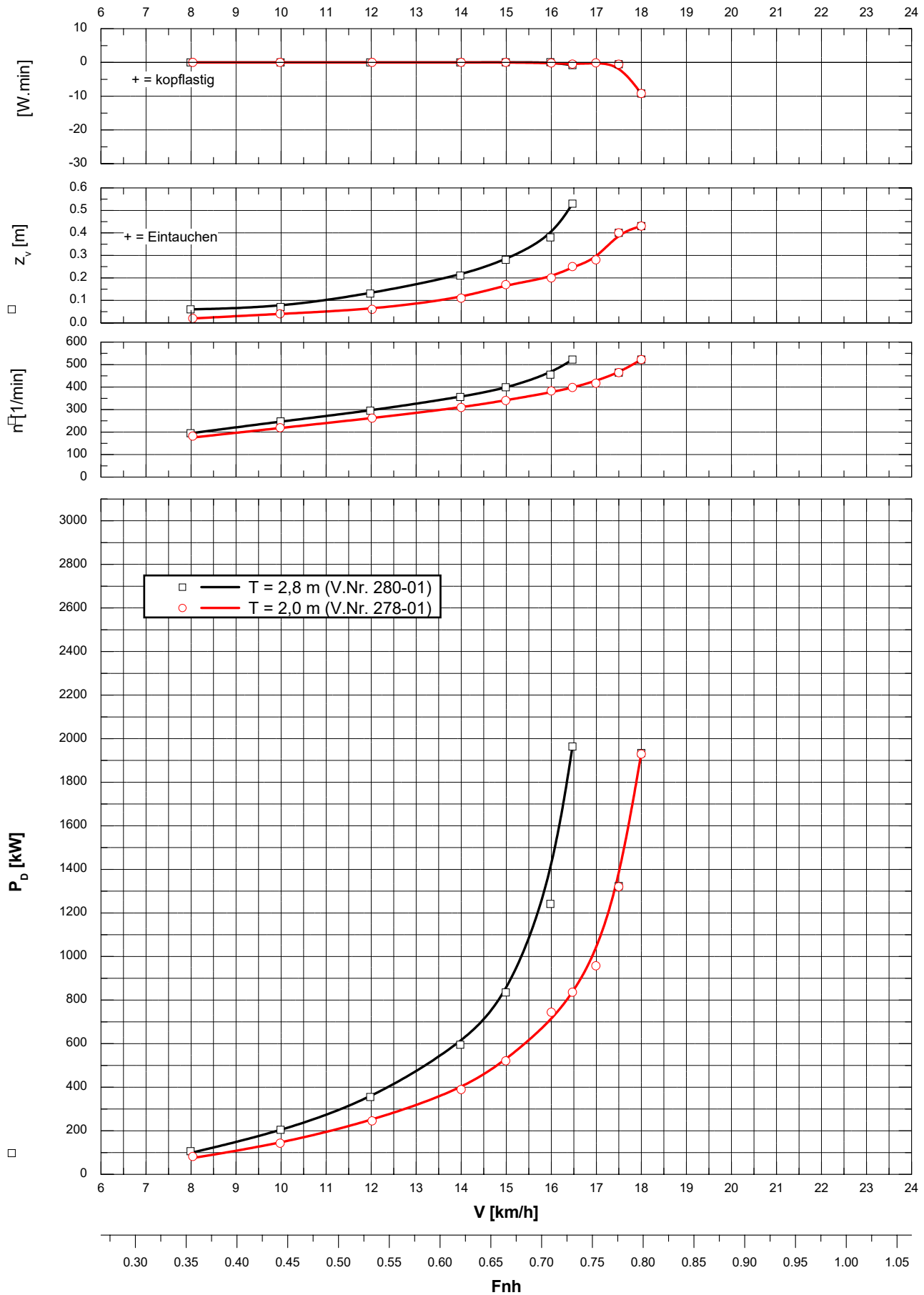
Widerstand - Systematische Versuche -
Spezifischer Widerstand
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 10,0 \text{ m}$
 seiti. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 2



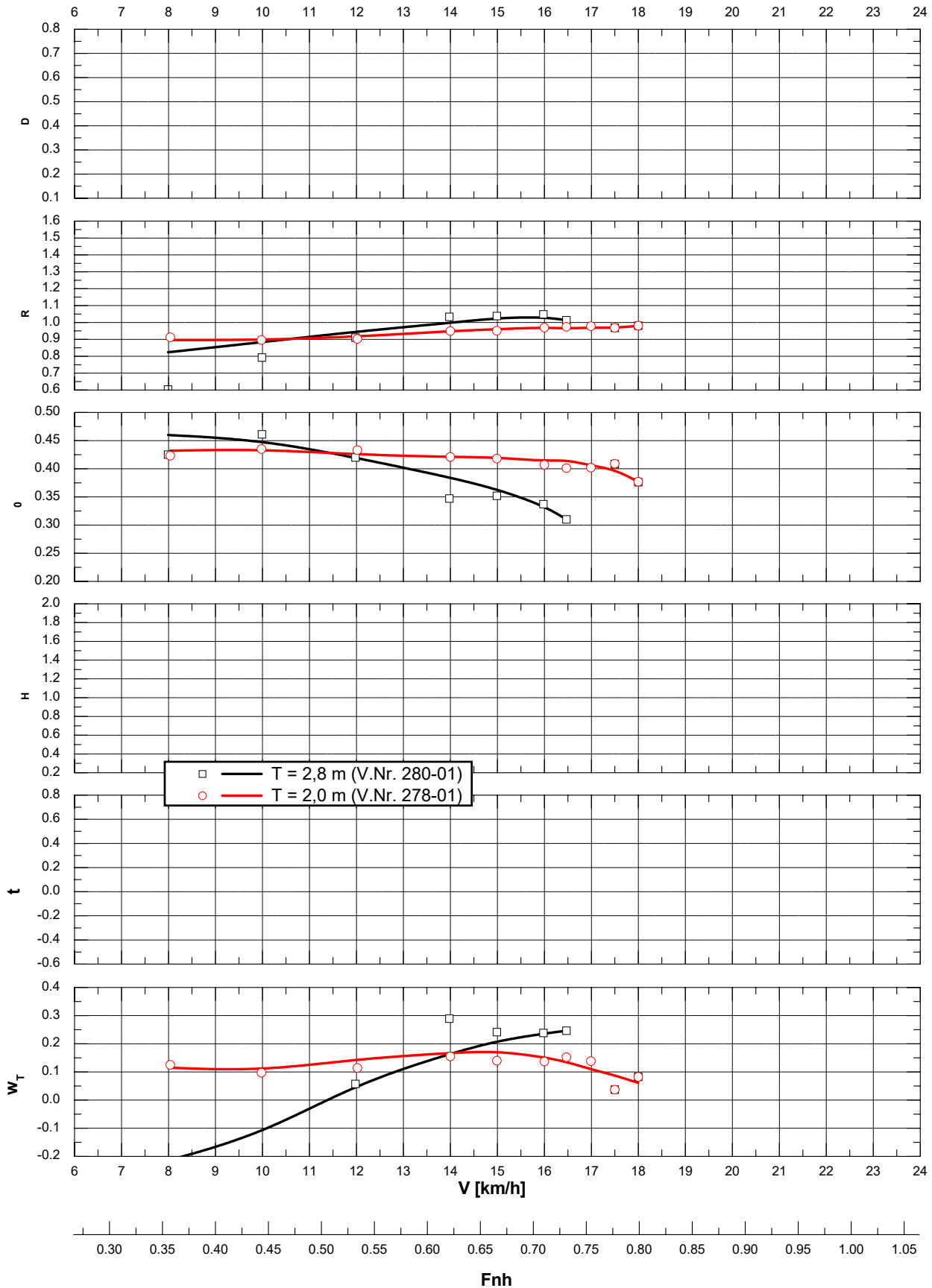
Propulsion - Systematische Versuche -
Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 4,0 \text{ m}$
seitl. unbegr. Fahrwasser

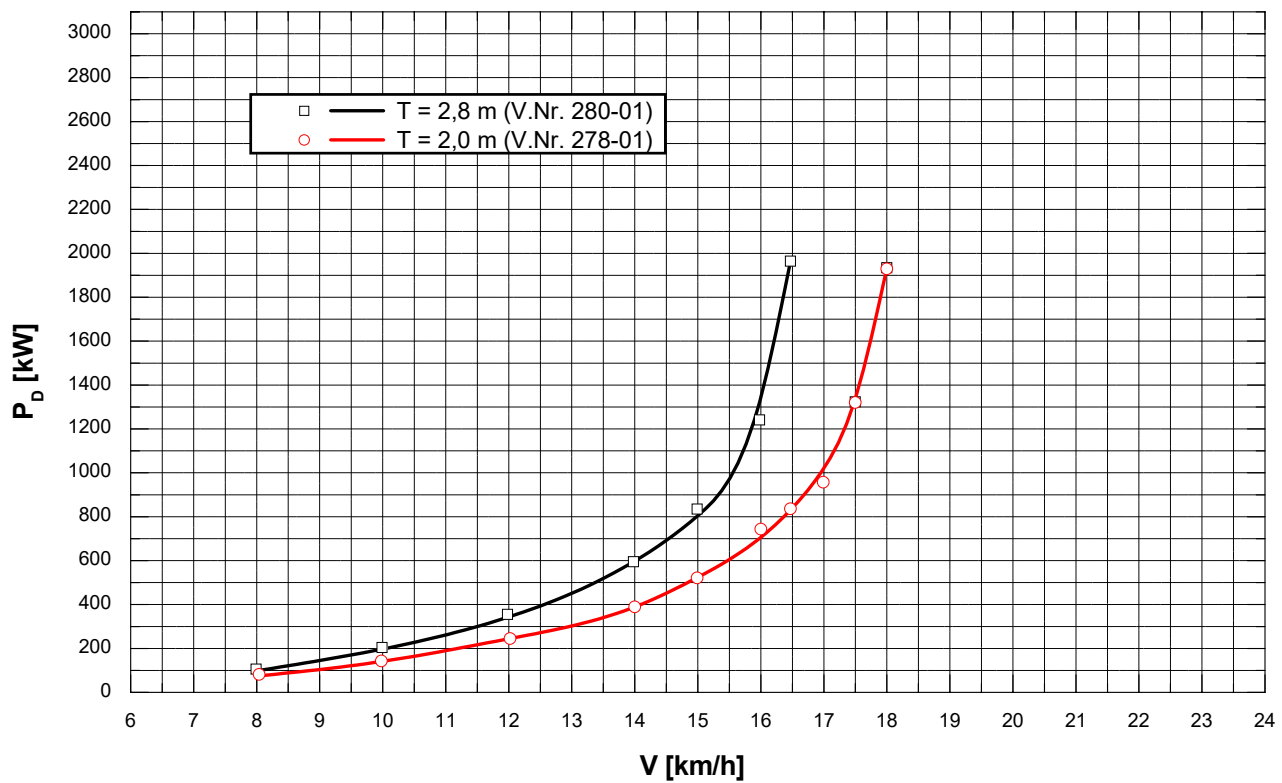
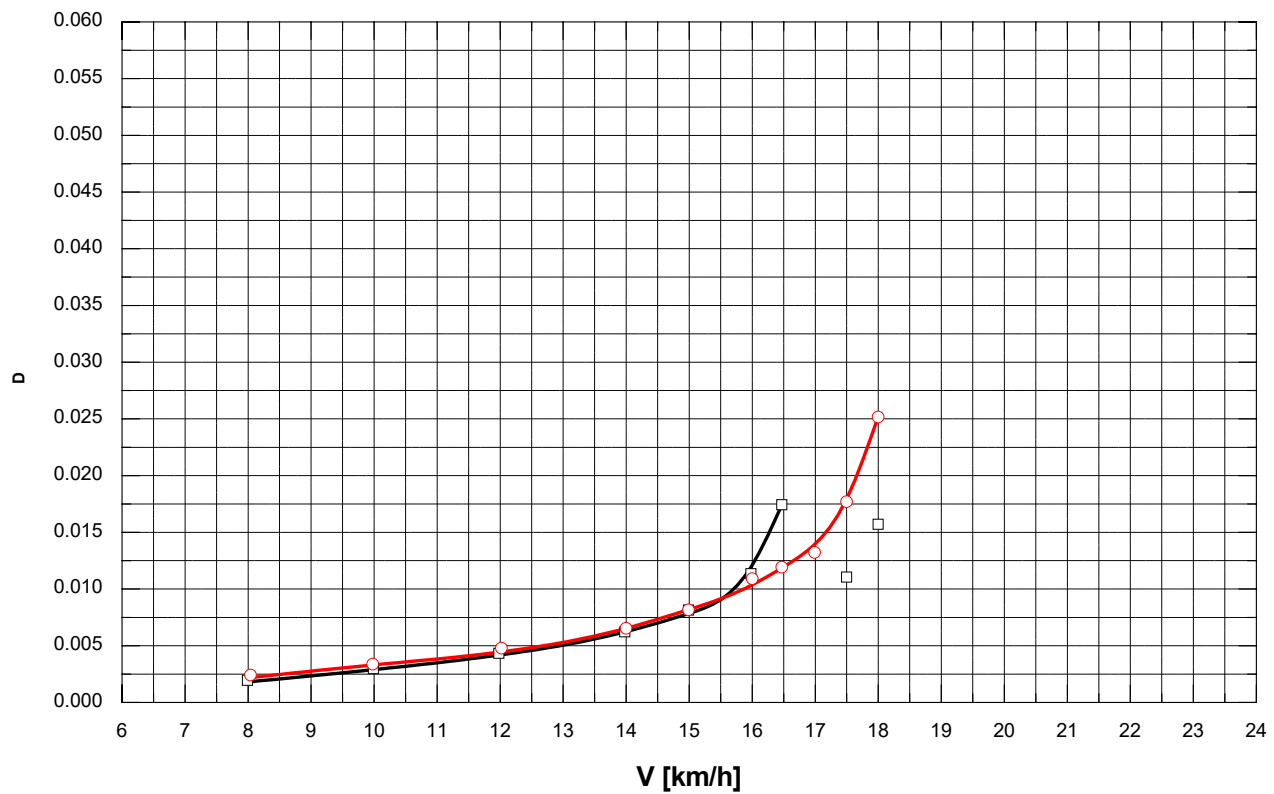
Blatt 1 von 3



Propulsion - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$
 seittl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 3



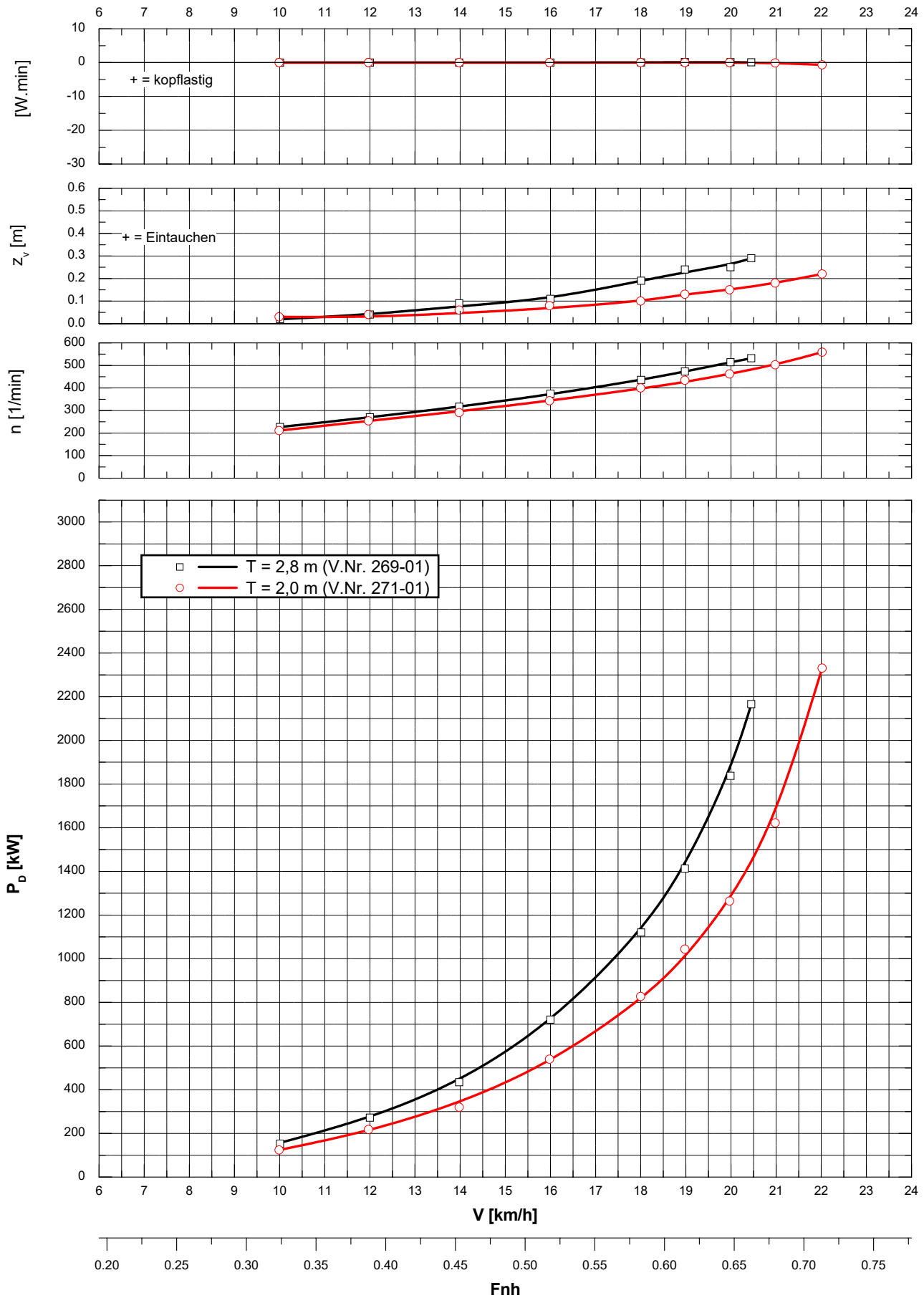
Propulsion - Systematische Versuche -
Spezifische Leistung
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$
 seilt. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 3 von 3



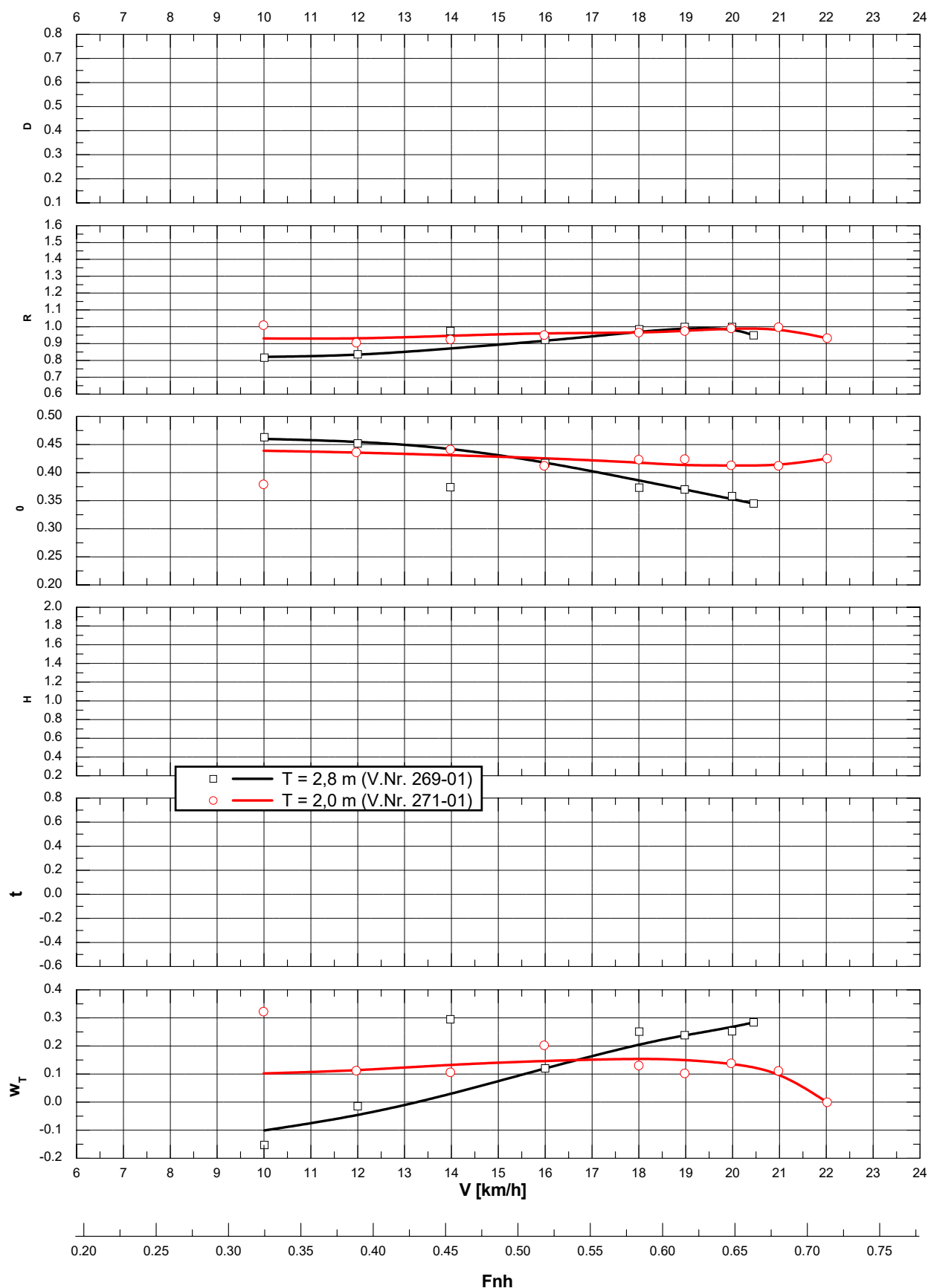
Propulsion - Systematische Versuche -
Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 7,5 \text{ m}$
seitl. unbegr. Fahrwasser

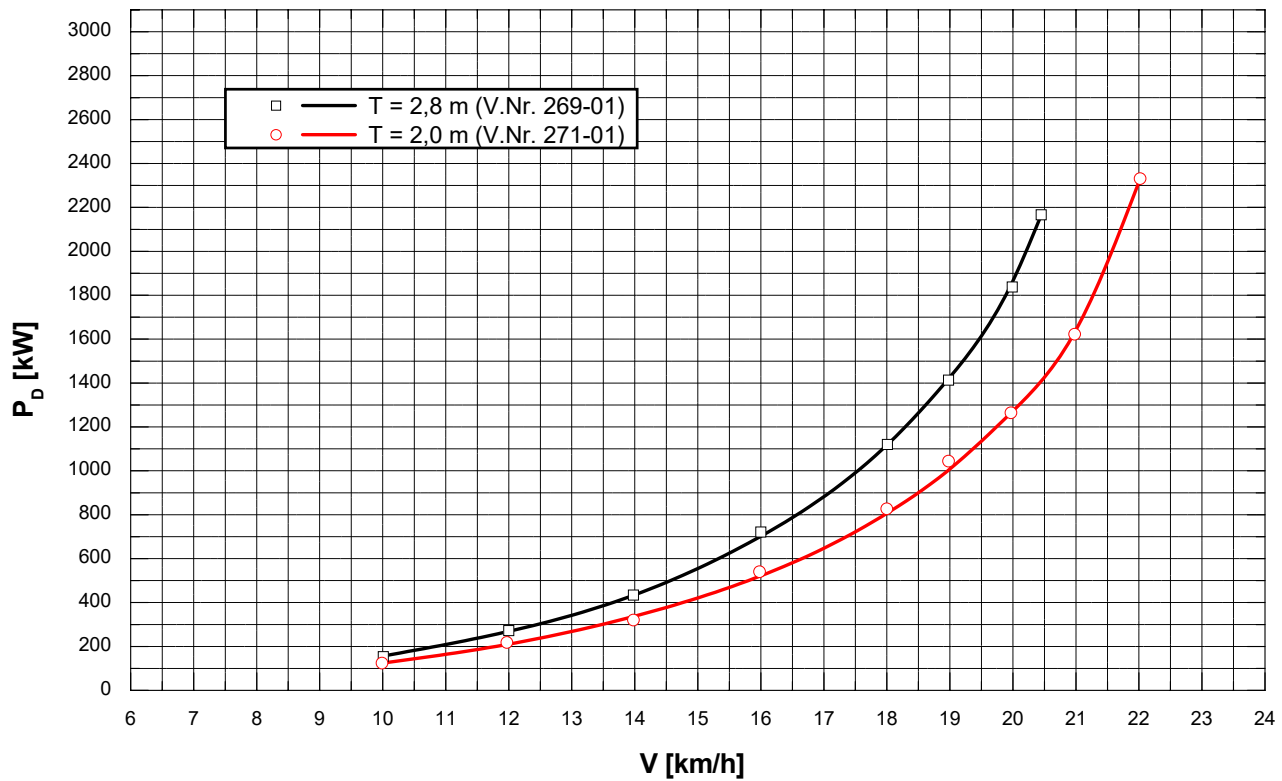
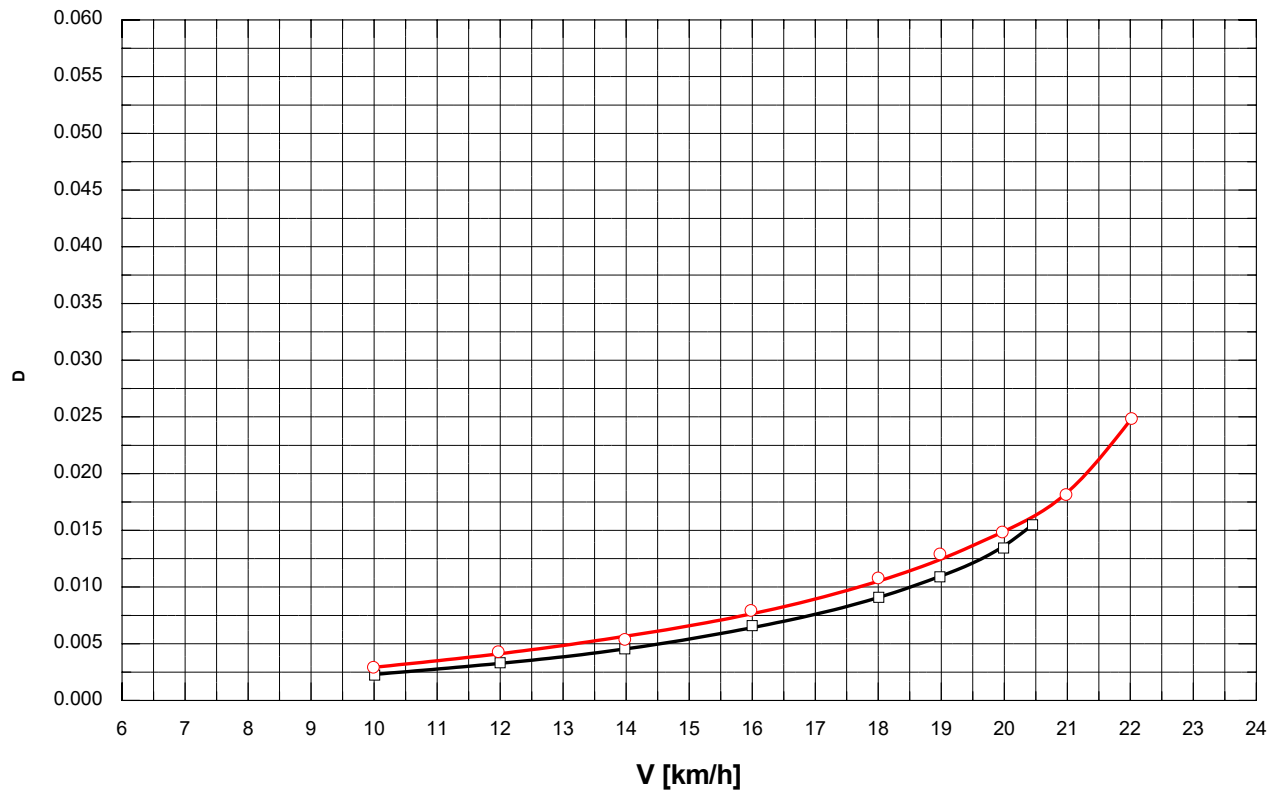
Blatt 1 von 3



Propulsion - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 7,5 \text{ m}$
 seittl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 3



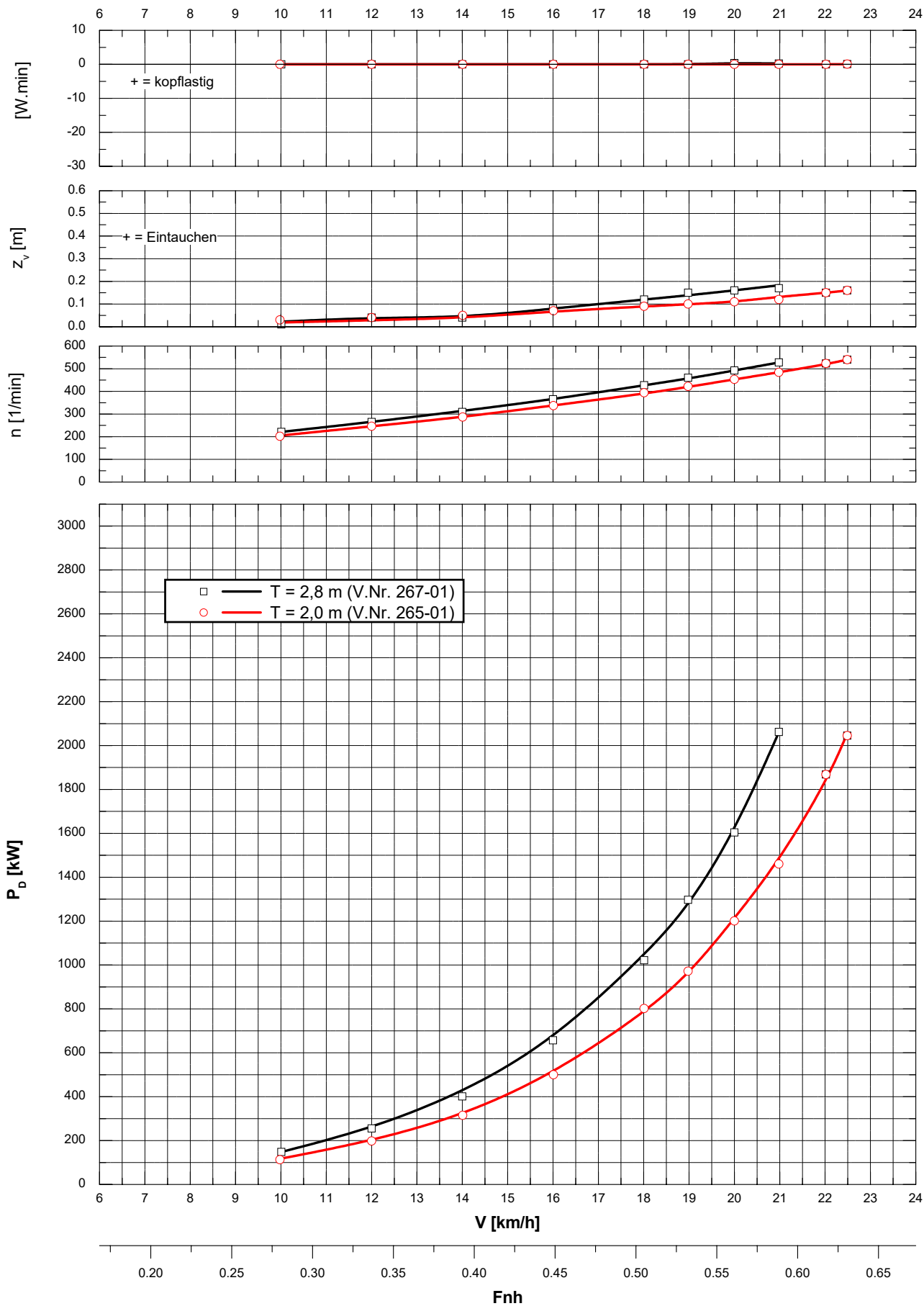
**Propulsion - Systematische Versuche -
Spezifische Leistung**
Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 7,5 \text{ m}$
seitl. unbegr. Fahrwasser
Blatt 3 von 3



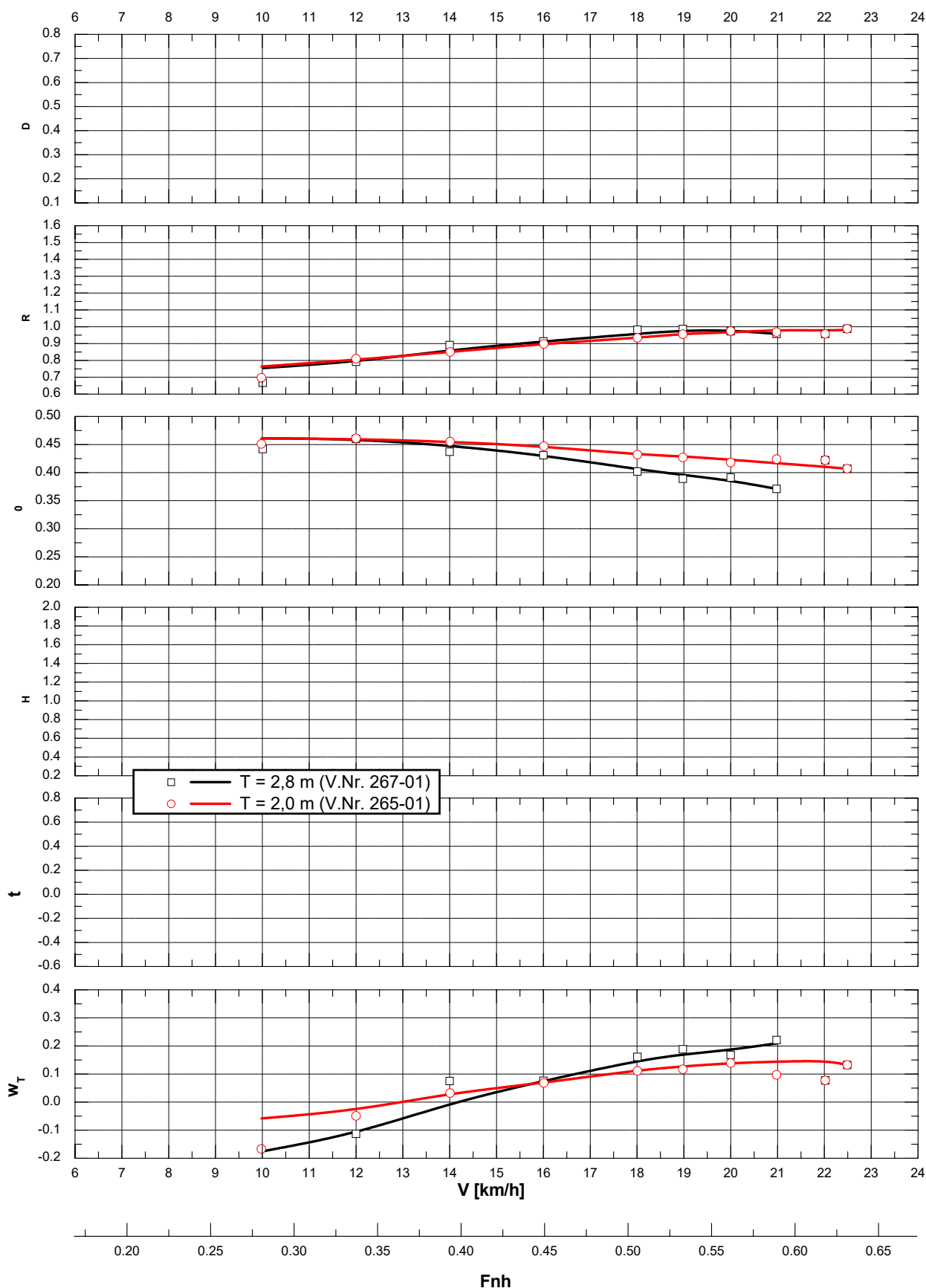
Propulsion - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 10,0 \text{ m}$
 seiltl. unbegr. Fahrwasser

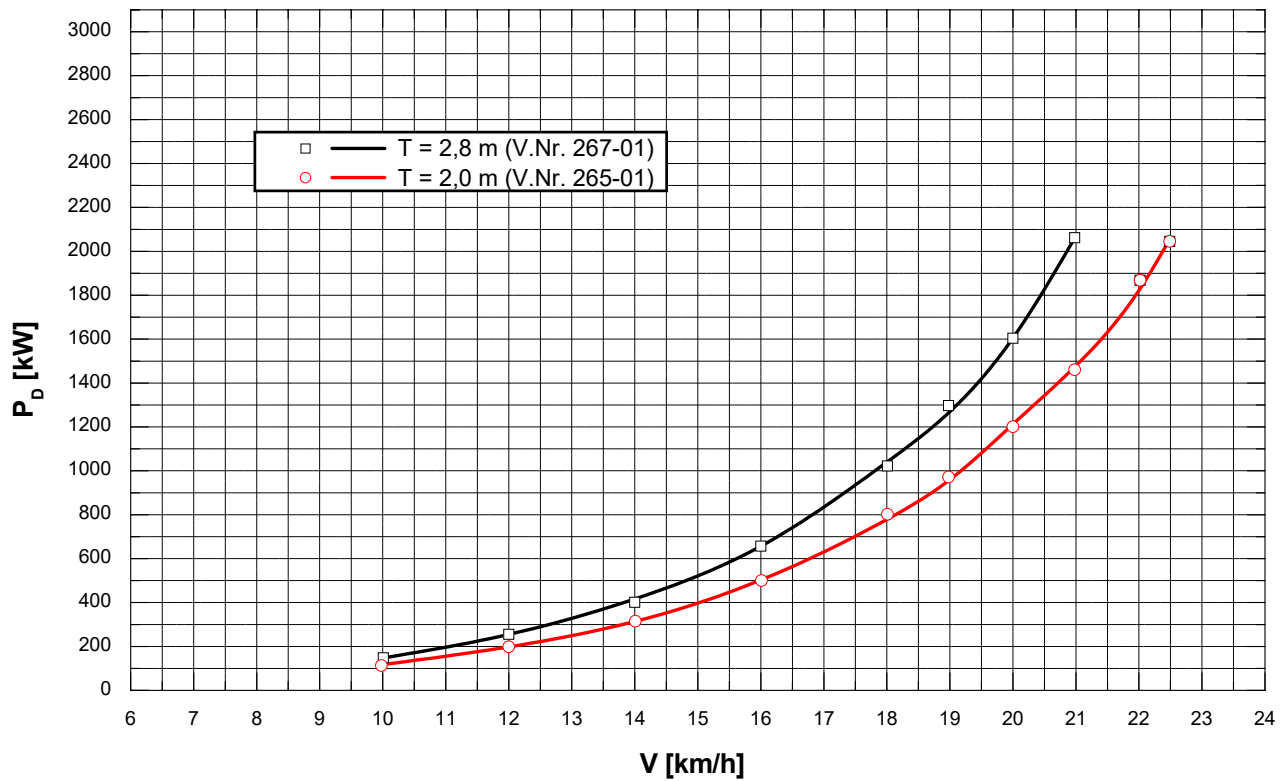
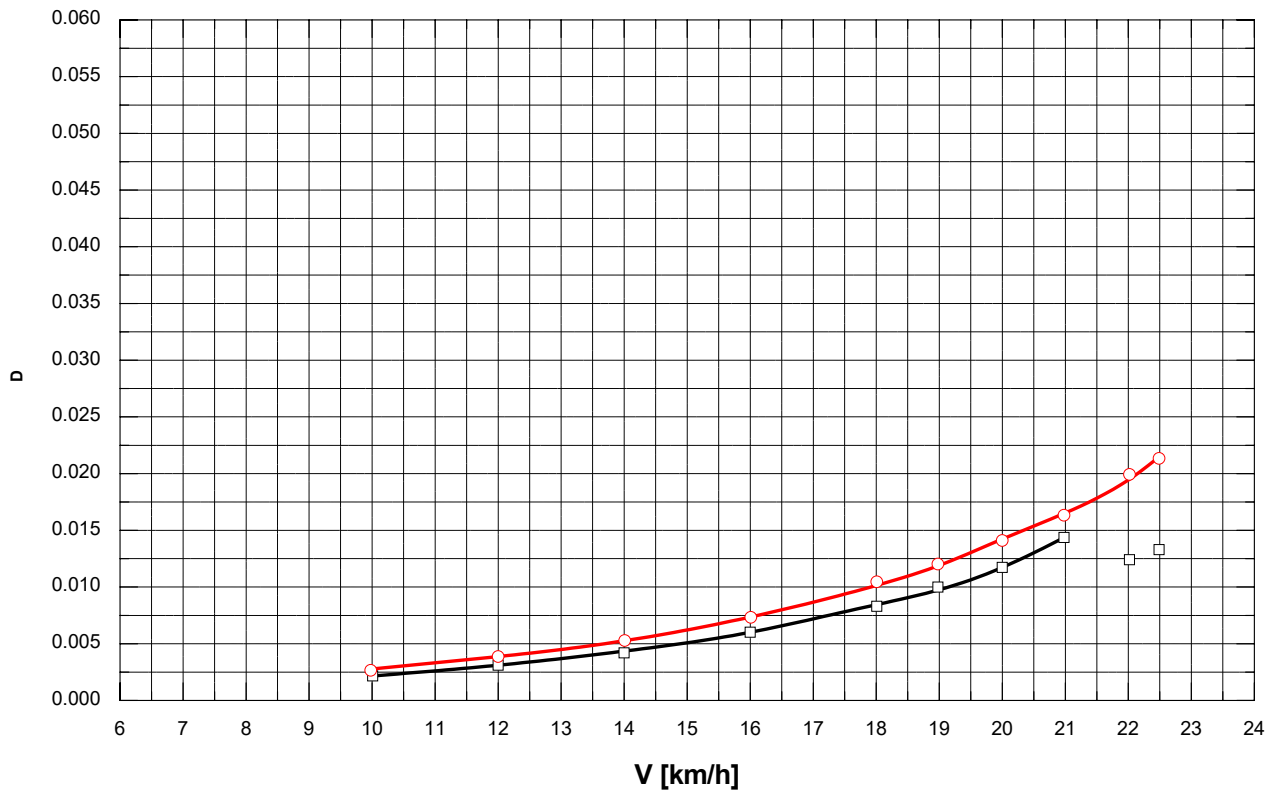
Blatt 1 von 3



Propulsion - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 10,0 \text{ m}$
 seitl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 3



Propulsion - Systematische Versuche -
Spezifische Leistung
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 10,0 \text{ m}$
 seittl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 3 von 3

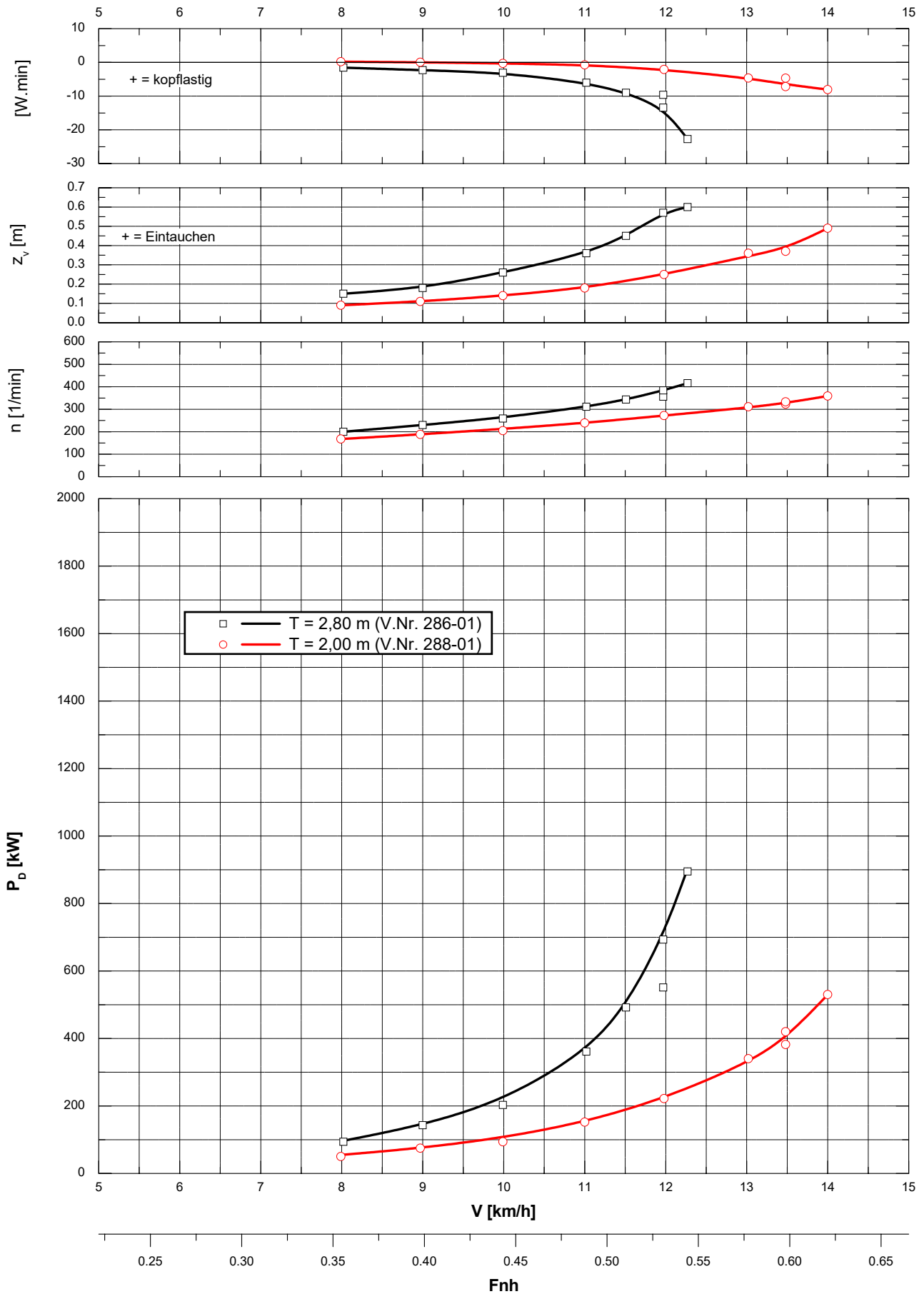


Propulsion - Systematische Versuche -
Semikat. (Kanalschiff, Formvar.6), $L_{OA} = 60,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

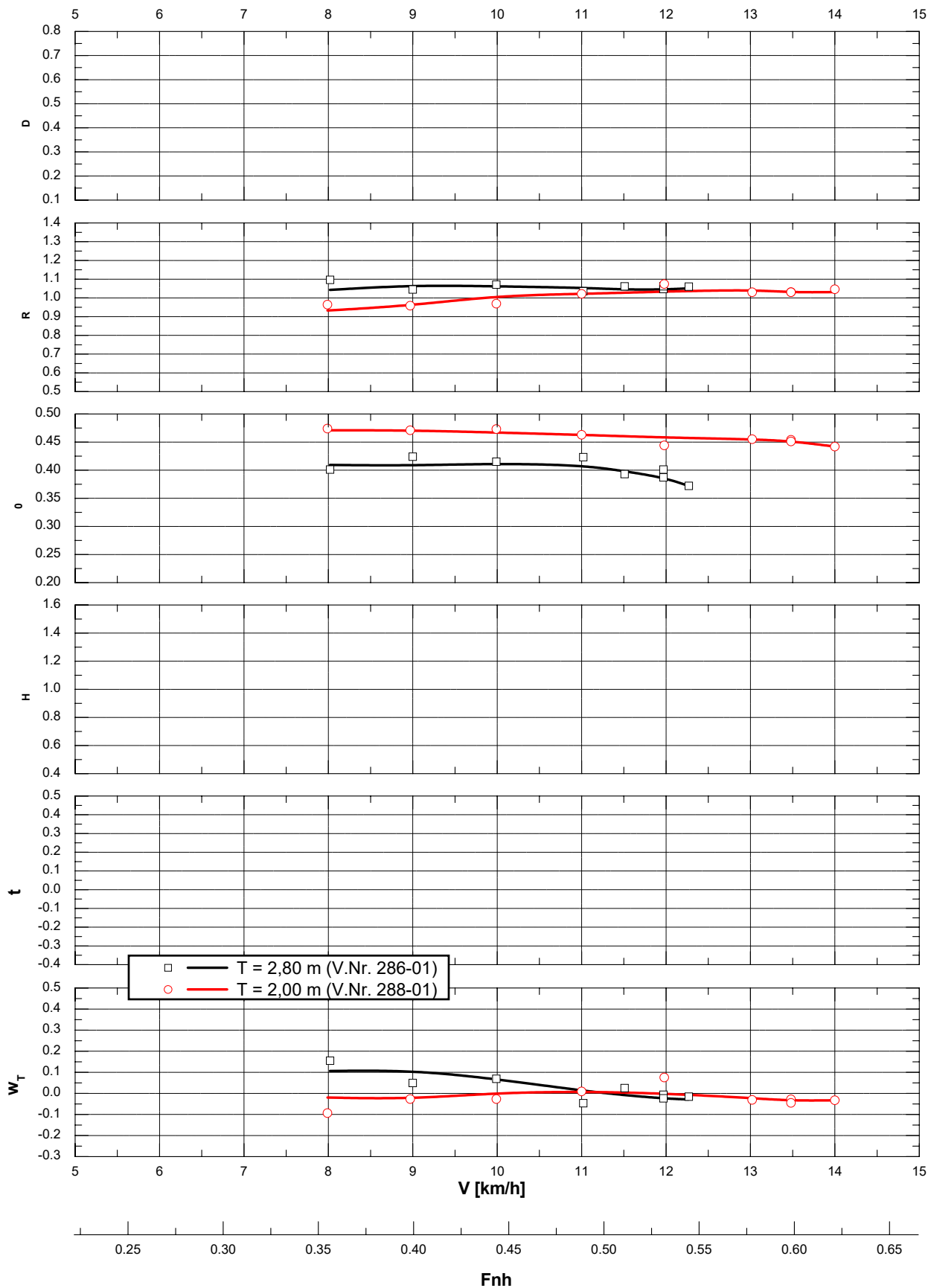
$h = 4,0 \text{ m}$

Standard-Rechteck-Kanal, $b_c = 42,0 \text{ m}$

Blatt 1 von 3



Propulsion - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 60,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$
 Standard-Rechteck-Kanal, $b_c = 42,0 \text{ m}$
 Blatt 2 von 3



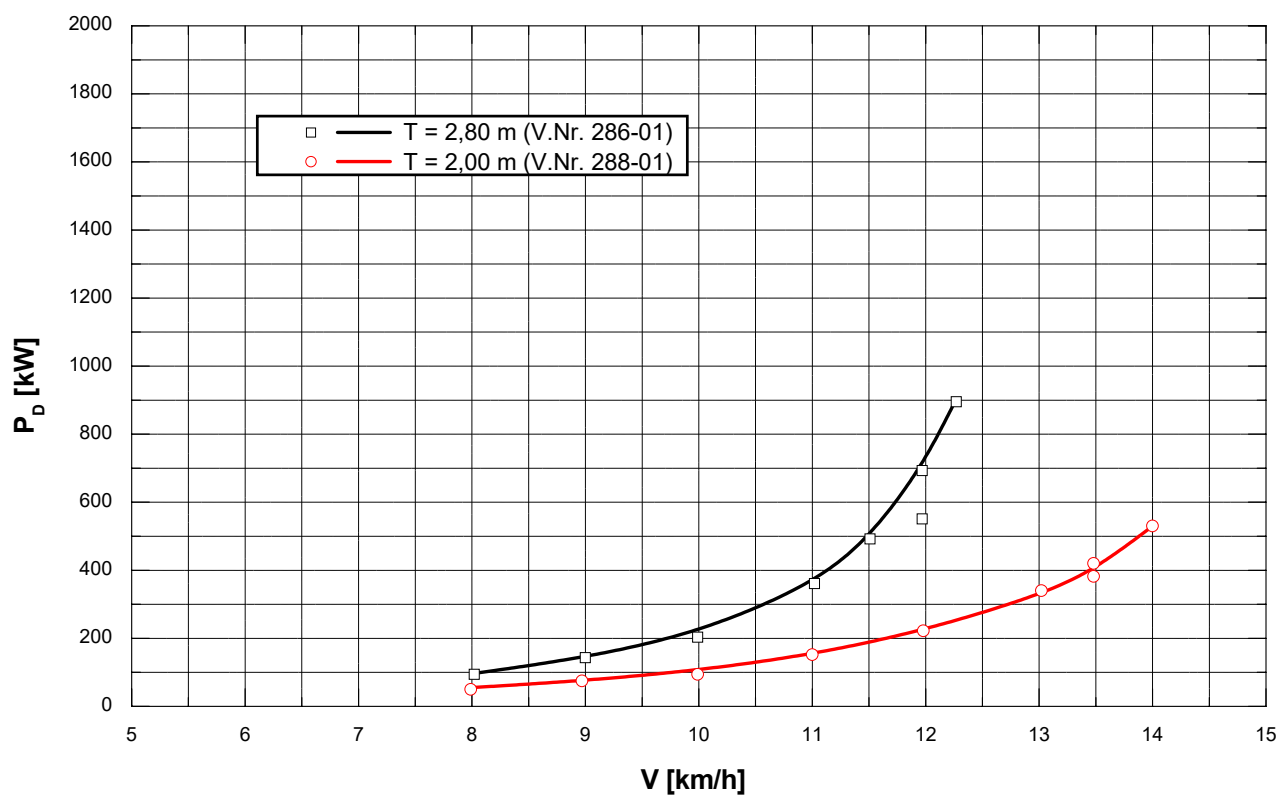
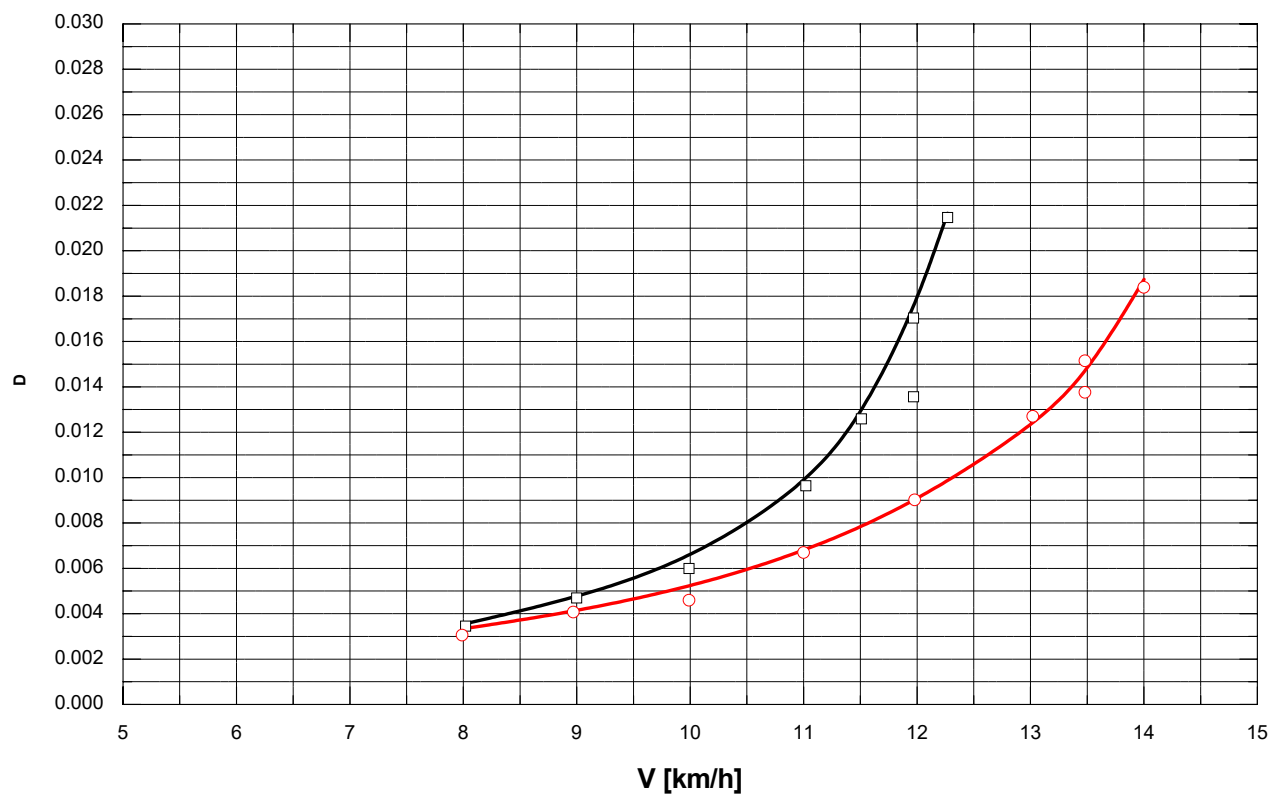
Propulsion - Systematische Versuche - Spezifische Leistung

Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 60,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 4,0 \text{ m}$

Standard-Rechteck-Kanal, $b_c = 42,0 \text{ m}$

Blatt 3 von 3

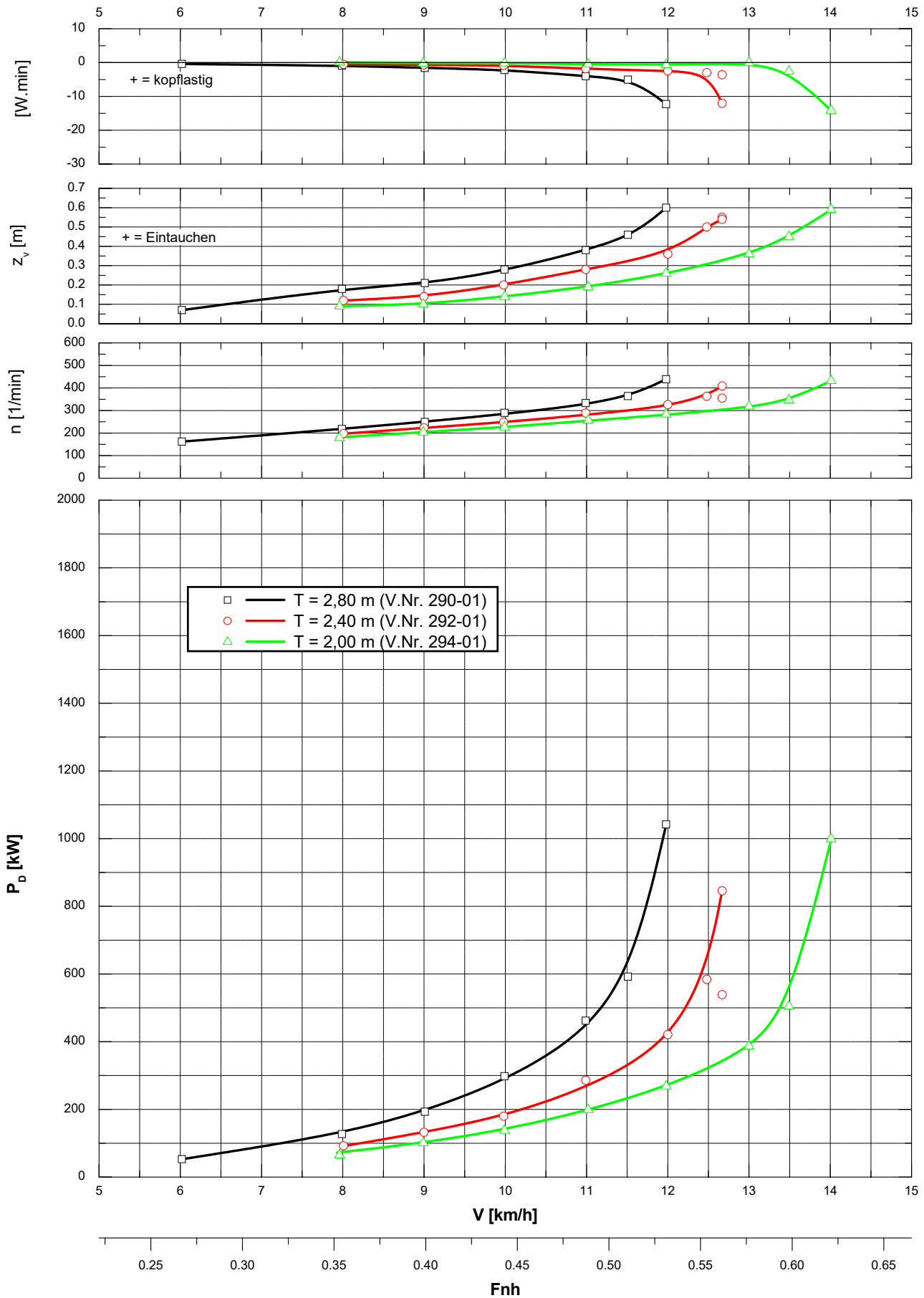


Propulsion - Systematische Versuche -
Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

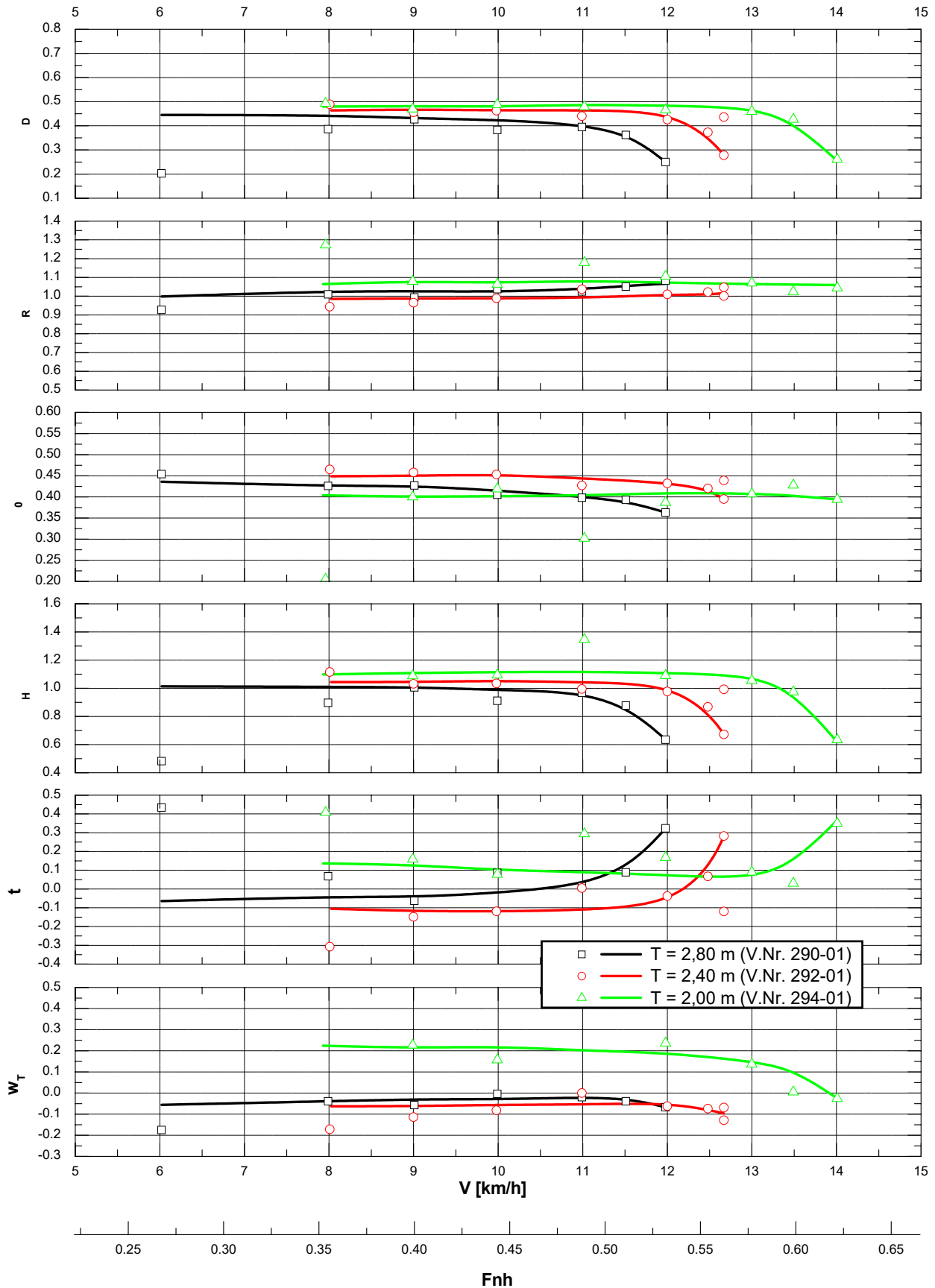
$h = 4,0 \text{ m}$

Standard-Rechteck-Kanal, $b_c = 42,0 \text{ m}$

Blatt 1 von 3

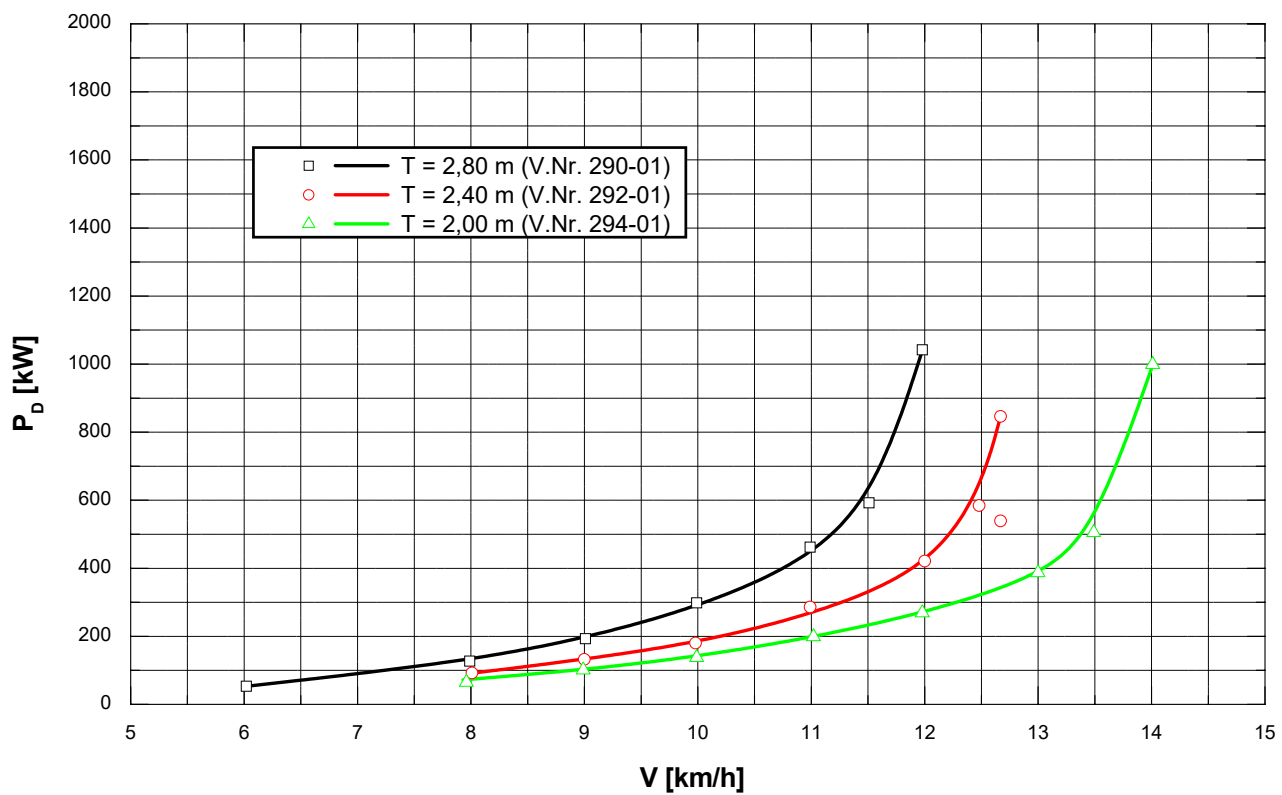
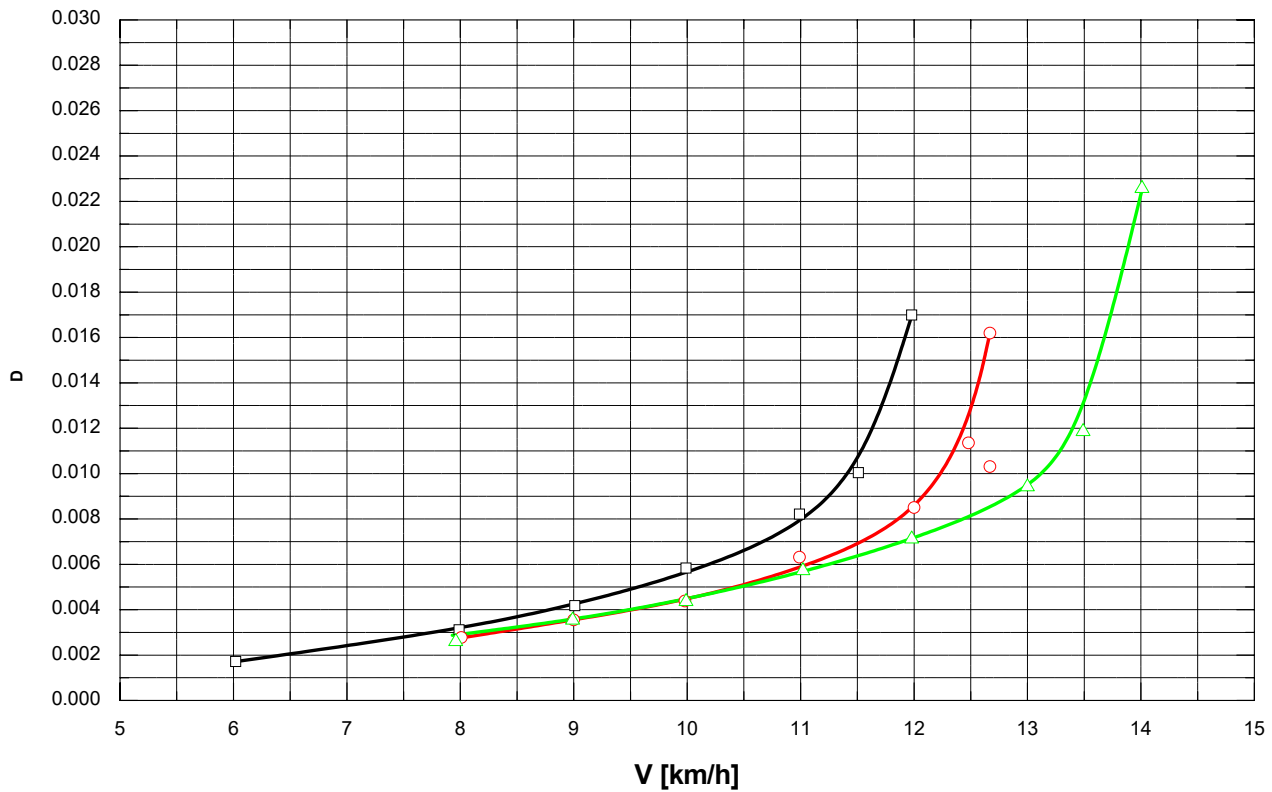


Propulsion - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$
 Standard-Rechteck-Kanal, $b_c = 42,0 \text{ m}$
 Blatt 2 von 3



Propulsion - Systematische Versuche -
Spezifische Leistung
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$
 Standard-Rechteck-Kanal, $b_c = 42,0 \text{ m}$

Blatt 3 von 3

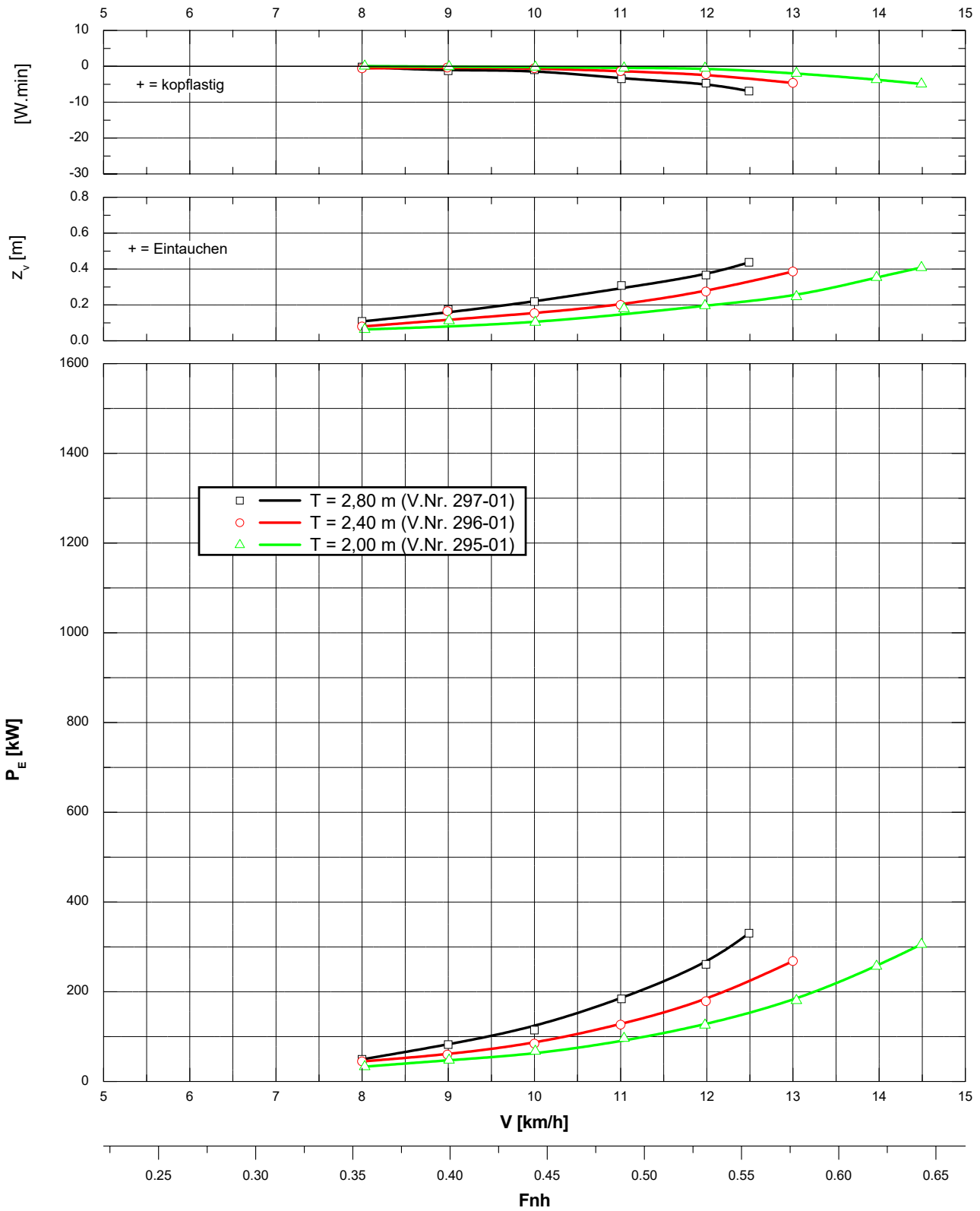


Widerstand - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

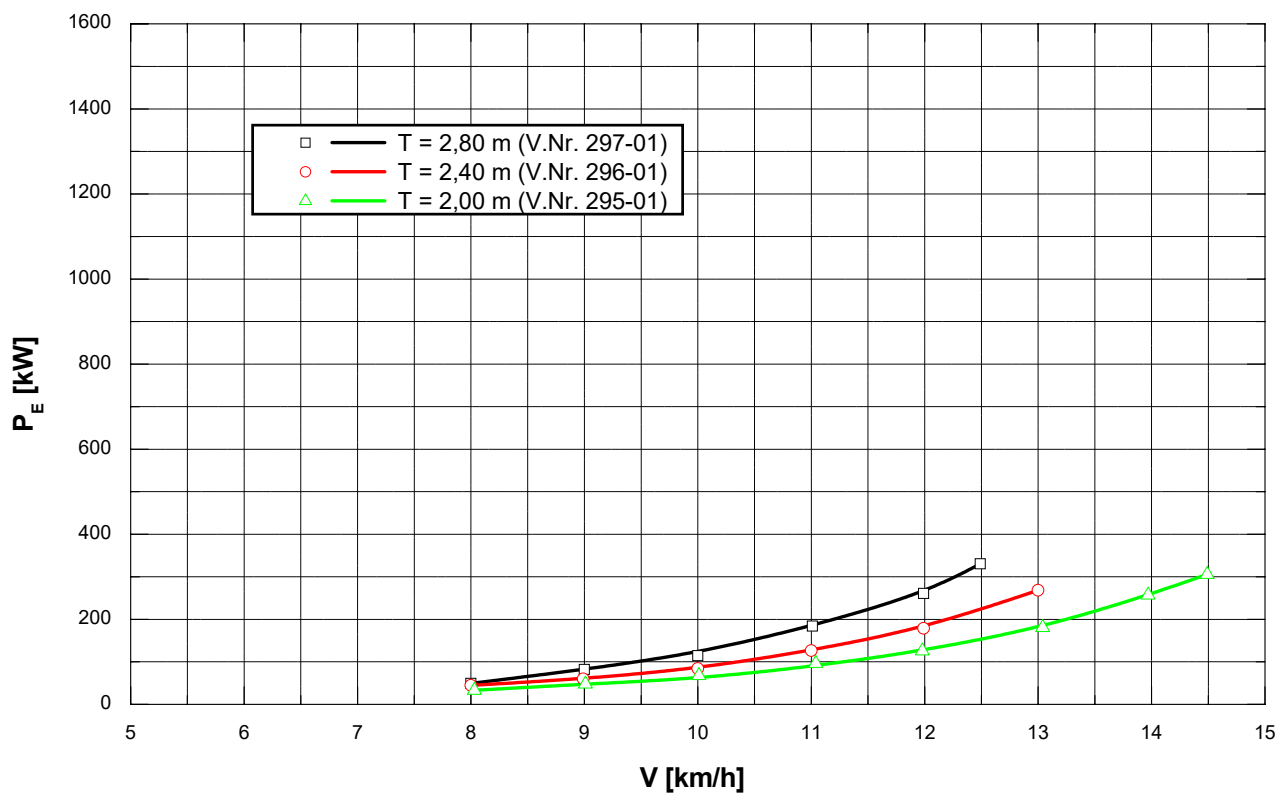
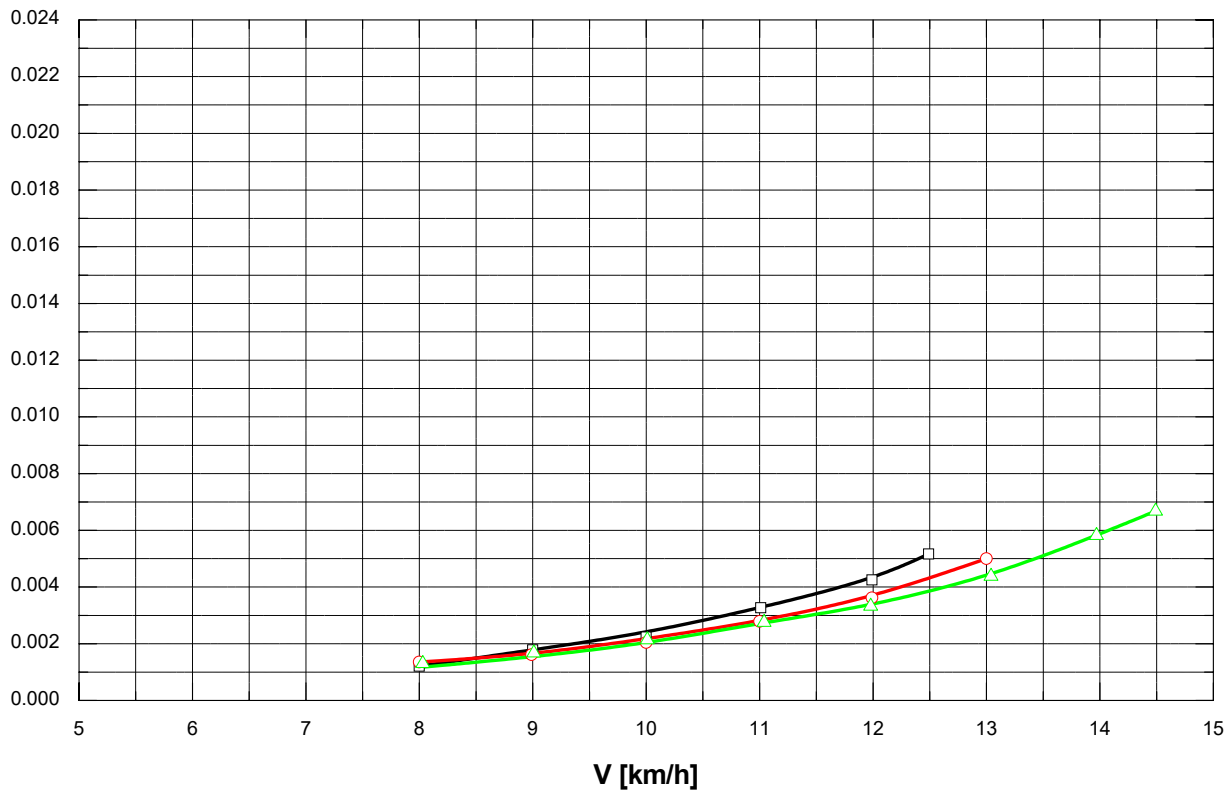
$h = 4,0 \text{ m}$

Standard-Rechteck-Kanal, $b_c = 42,0 \text{ m}$

Blatt 1 von 2



Widerstand - Systematische Versuche -
Spezifischer Widerstand
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$
 Standard-Rechteck-Kanal, $b_c = 42,0 \text{ m}$
 Blatt 2 von 2

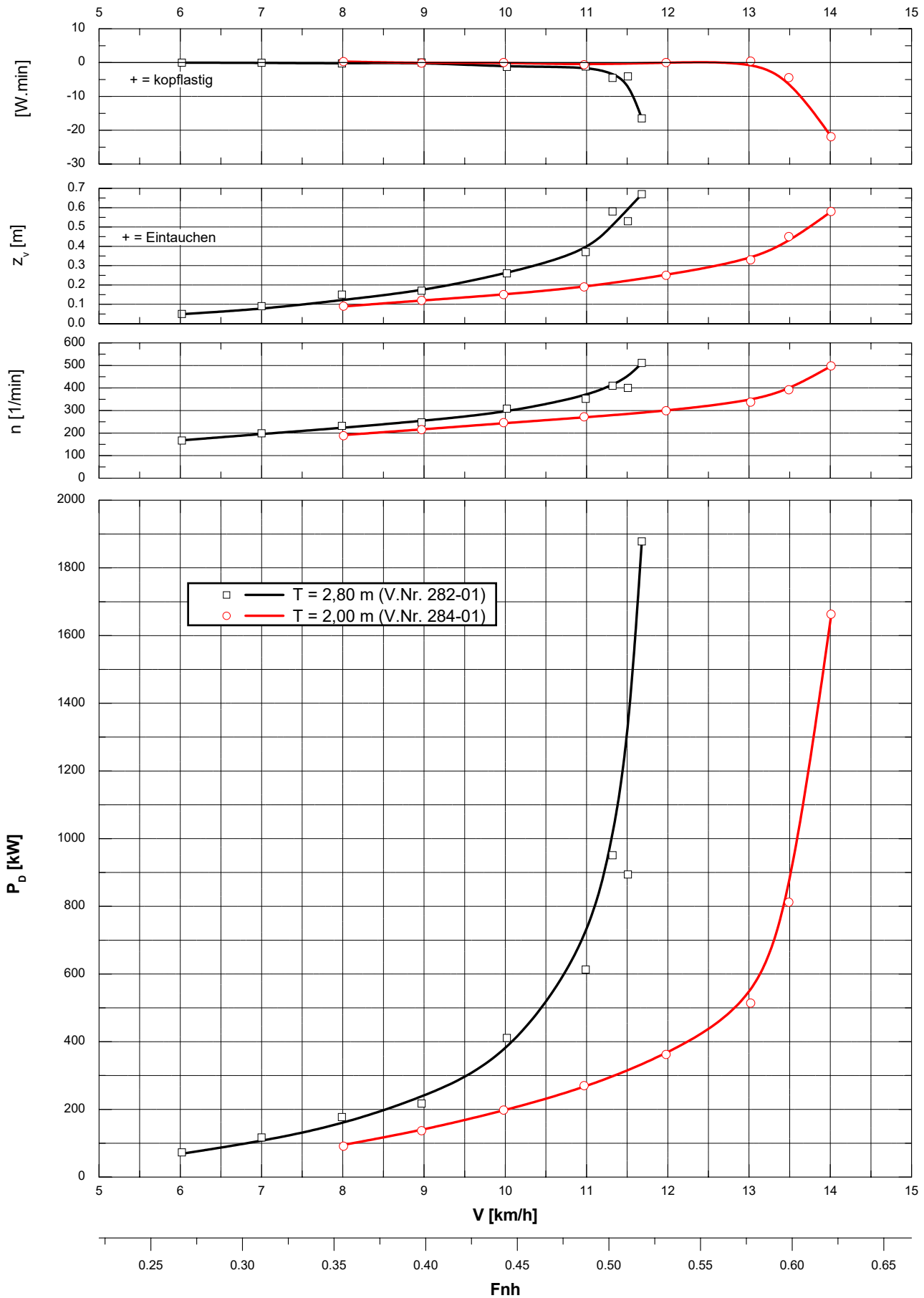


Propulsion - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

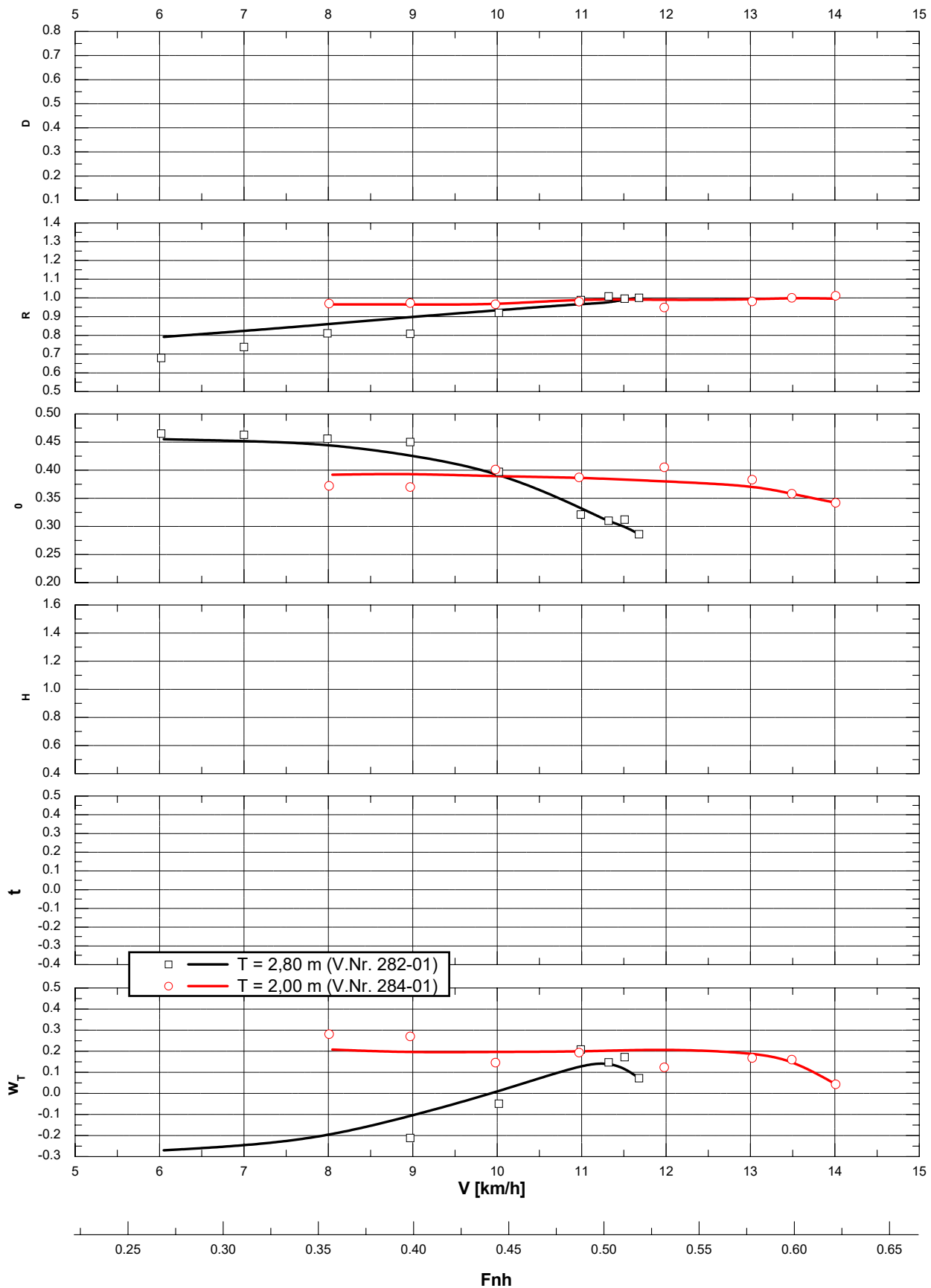
$h = 4,0 \text{ m}$

Standard-Rechteck-Kanal, $b_c = 42,0 \text{ m}$

Blatt 1 von 3



Propulsion - Systematische Versuche -
 Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$
 Standard-Rechteck-Kanal, $b_C = 42,0 \text{ m}$
 Blatt 2 von 3



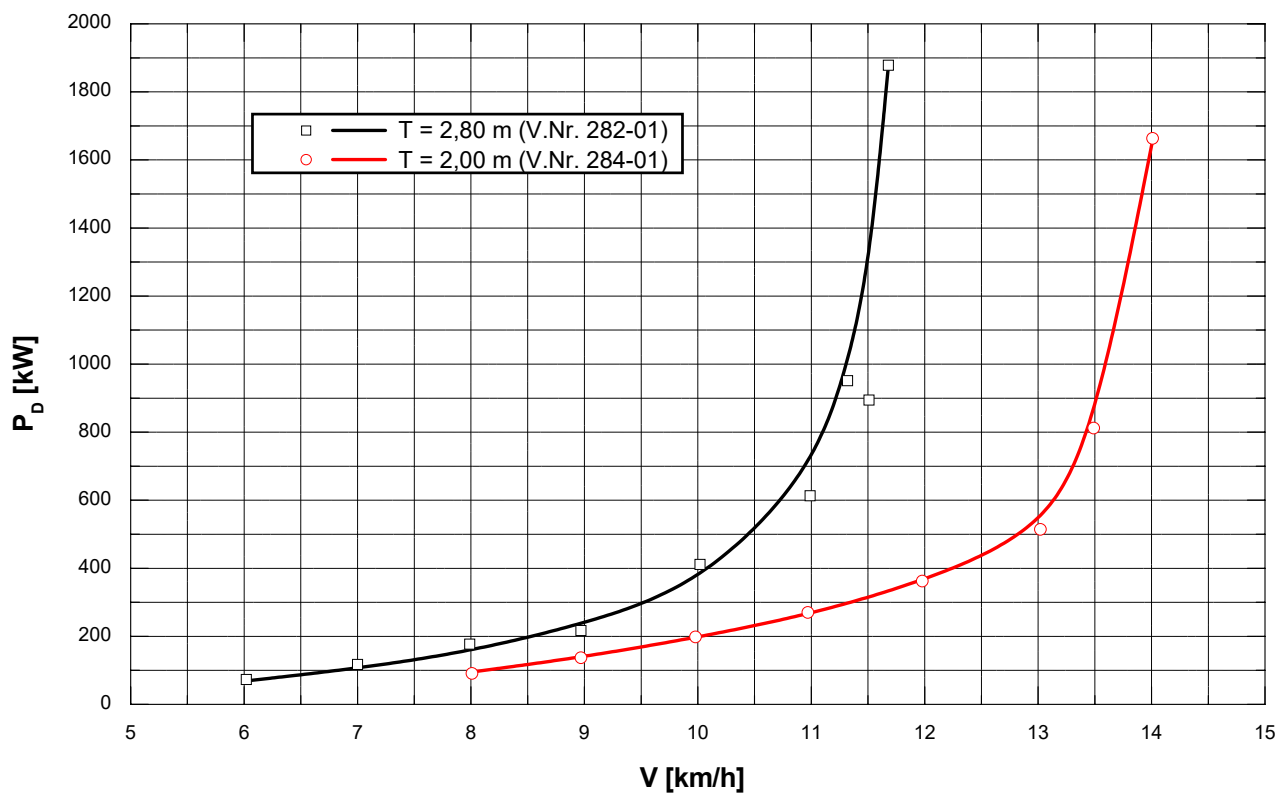
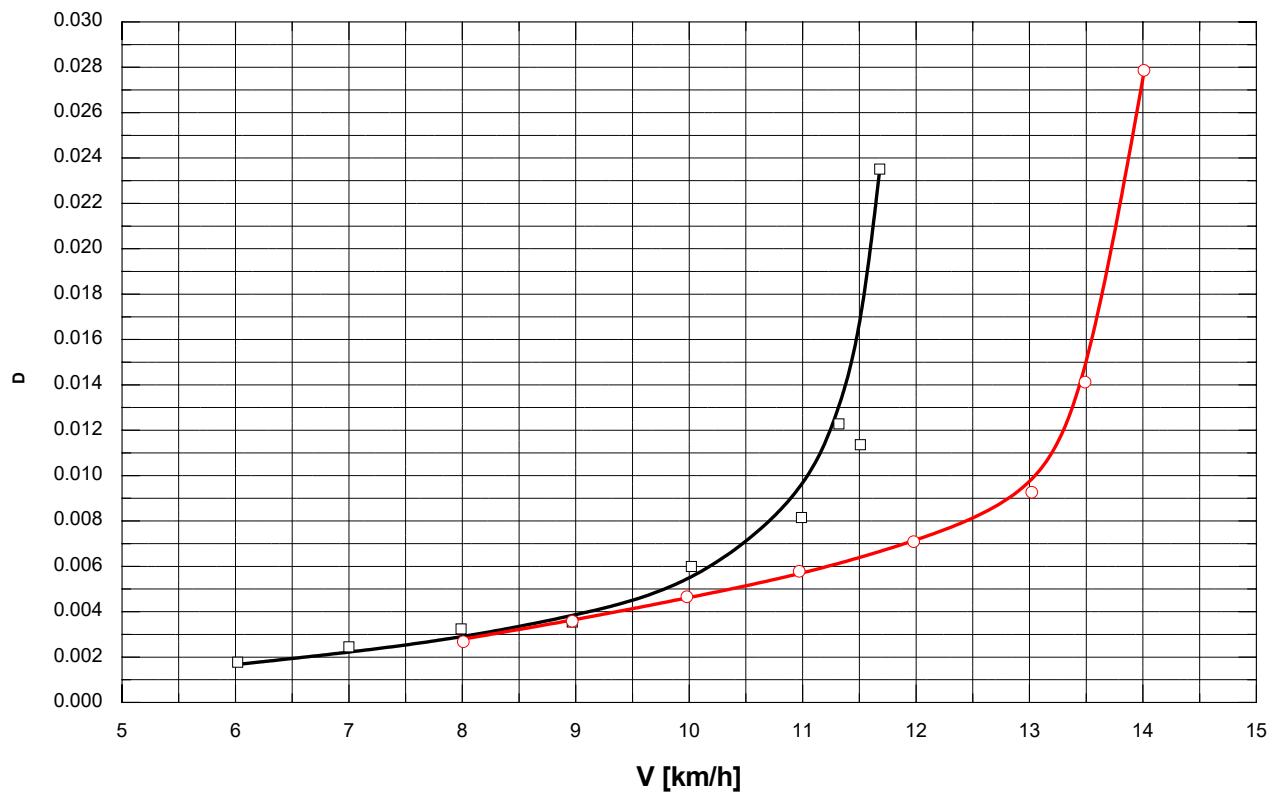
Propulsion - Systematische Versuche - Spezifische Leistung

Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 4,0 \text{ m}$

Standard-Rechteck-Kanal, $b_c = 42,0 \text{ m}$

Blatt 3 von 3



Semikatamaran, Rheinschiff

Kurzbeschreibung und Hauptdaten der untersuchten Formvarianten

Kurzbeschreibung der Formvarianten

Form- variante	h_{MR} [m]	Seitenrumpf Bug	Heck	Mittellrumpf Bug	Heck
1	1,00	asymm., innen gerade	V-Spt., symmetrisch	Ponton wie SEMKAT I	Ponton, S-förmige Gillung
2	1,00	Wie Formvar. 1	asymm., i. gerade, Spiegel	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 1
3	1,00	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 1, um L = 8,0 m vorgezogen
4	1,00	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 1	Ponton, gerade Gillung, um L = 8,0 m vorgezogen
5	1,00	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 2	Wie Formvar. 1	Ponton, gerade Gillung
5A	1,50	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 2	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 5
6	1,00	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 2	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 1, zus. 3. Propeller
7	1,00	Wie Formvar. 1	asymm., i. gerade, scharf auslaufend	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 1
8	1,00	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 7, verschlankt, a. überkragende T.Schürze	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 1
9	1,00	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 8, neuer Tunnel, gerundete A.Kante	Wie Formvar. 1	Wie Formvar. 1

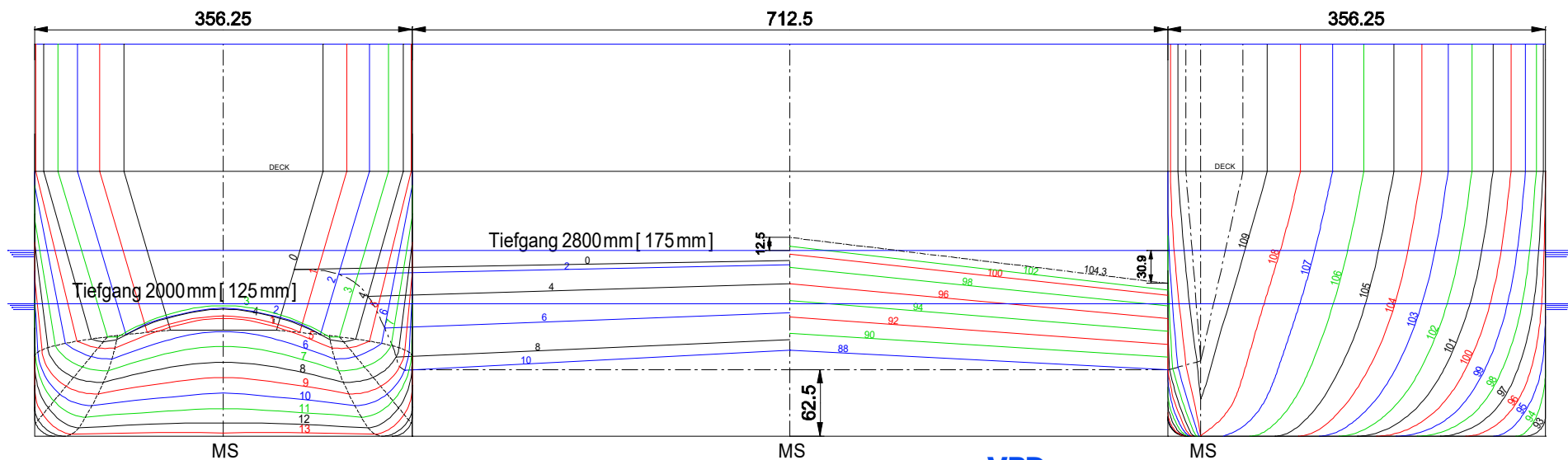
Hauptdaten der Formvarianten

Form- variante	L_{OA} [m]	$L_{OA,MR}$ [m]	B [m]	B_{SR} [m]	B_{MR} [m]	h_{MR} [m]	T [m]	L_{WL} [m]	$L_{WL,MR}$ [m]	Vol [m ³]	S [m ²]
1	110,00	104,30	22,80	5,70	11,40	1,000	2,800	109,701	0,000	4828,0	3115,5
2	110,00	104,30	22,80	5,70	11,40	1,000	2,000	109,499	98,325	2998,7	2780,9
						1,000	2,800	109,701	104,301	4388,5	3035,6
3	110,00	96,30	22,80	5,70	11,40	1,000	2,800	109,701	96,301	4650,2	3009,0
4	110,00	96,30	22,80	5,70	11,40	1,000	2,800	109,701	96,301	4644,0	3009,0
5	110,00	104,30	22,80	5,70	11,40	1,000	2,500	109,701	105,854	4132,9	2987,3
						1,000	2,800	109,701	104,301	4812,8	3101,2
5A	110,00	104,30	22,80	5,70	11,40	1,500	2,800	109,701	104,029	4321,3	3180,5
6	110,00	104,30	22,80	5,70	11,40	1,000	2,800	109,701	104,301	4814,0	3101,2
7	118,00	112,30	22,80	5,70	11,40	1,000	2,800	117,701	112,301	4932,4	3259,4
8	118,00	112,30	22,80	5,70	11,40	1,000	2,800	117,696	112,288	4922,6	3248,6
9	118,00	112,30	22,80	5,70	11,40	1,000	2,800	117,696	112,300	4942,2	3259,4

Hauptdaten der Formvariante 8 - Tiefgangvariation (Serienversuche) -

Form- variante	L_{OA} [m]	$L_{OA,MR}$ [m]	B [m]	B_{SR} [m]	B_{MR} [m]	h_{MR} [m]	T [m]	L_{WL} [m]	$L_{WL,MR}$ [m]	Vol [m ³]	S [m ²]
8	118,00	112,30	22,80	5,70	11,40	1,000	2,800	117,696	112,288	4922,6	3248,6
						1,000	2,400	117,520	112,128	4123,0	3125,8
						1,000	2,000	117,488	106,272	3072,0	3002,9

Semikatamaran , Rheinschiff Formvariante 1



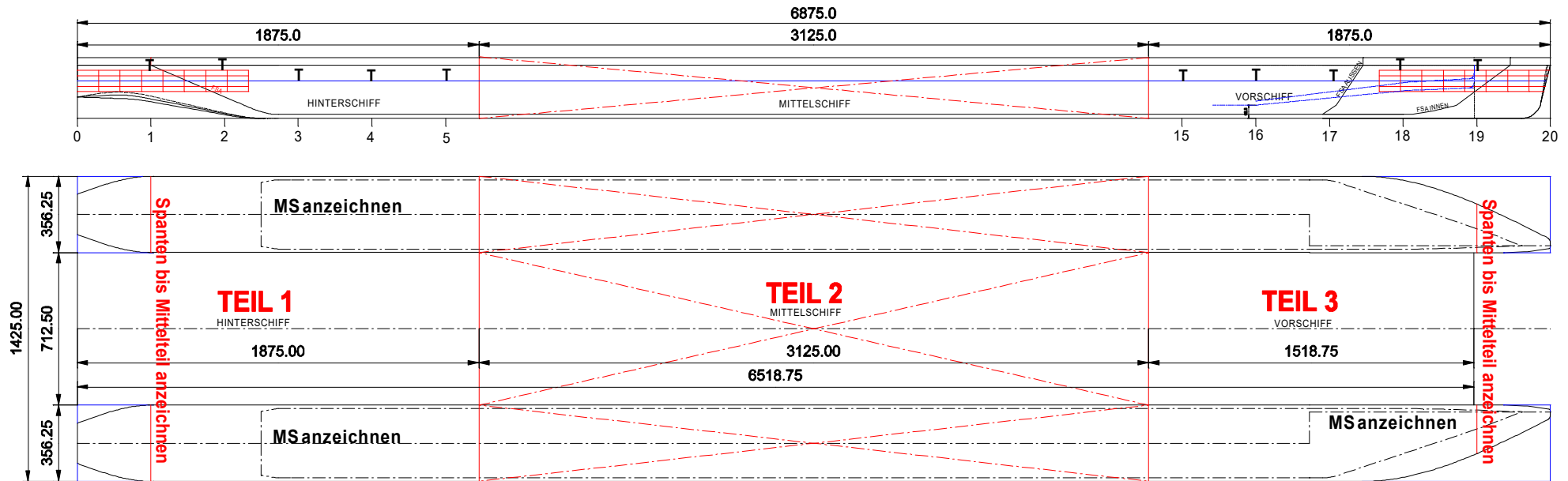
Model M1693 Basis 62.5
Scale 1 : 16



Länge Seitenrumpf = 6875.0 mm	Länge Mittelrumpf = 6518.75 mm
Länge Hinterschiff = 1875.0 mm	Länge Hinterschiff = 1875.0 mm
Länge Mittelteil = 3125.0 mm	Länge Mittelteil = 3125.0 mm
Länge Vorschiff = 1875.0 mm	Länge Vorschiff = 1518.75 mm
Seitenrumpf Breite = 356.25 mm	Mittelrumpf Breite = 712.5 mm
Bauspt. Abstand = 62.5 mm	Gesamt Breite a. Spt. = 1425.0 mm

TIEFGANG_{max} 175.0 mm

Semikatamaran , Rheinschiff Formvariante 1



Turbulenzzerzeuger
Art: Sandstreifen
Lage: Spt. 17 und 19

WL-Abst. = 4 x 25.0 mm
Fotonetz = 8 x 100 mm

Model M1693 Basis 62.5
Scale 1 : 16
Semikat - Rheinschiff

Länge Seitenrumpf = 6875.0 mm
Länge Hinterschiff = 1875.0 mm
Länge Mittelteil = 3125.0 mm
Länge Vorschiff = 1875.0 mm
Seitenrumpf Breite = 356.25 mm
Bauspt. Abstand = 62.5 mm

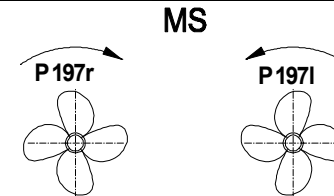
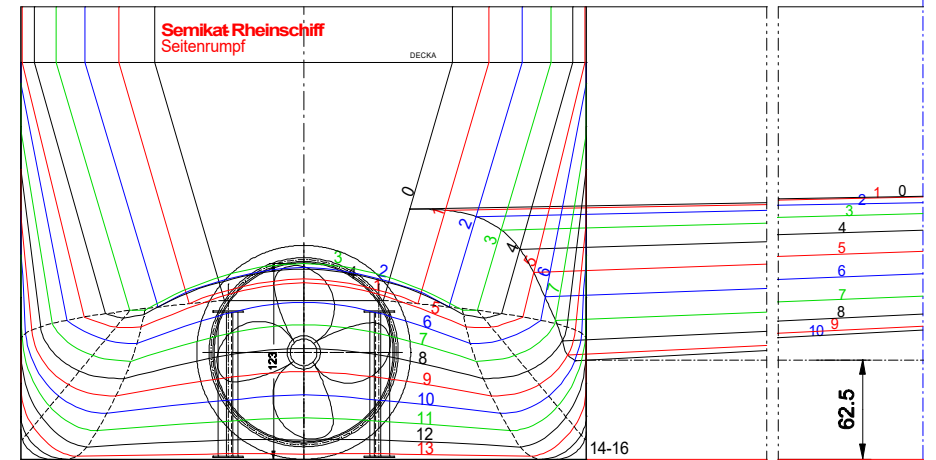
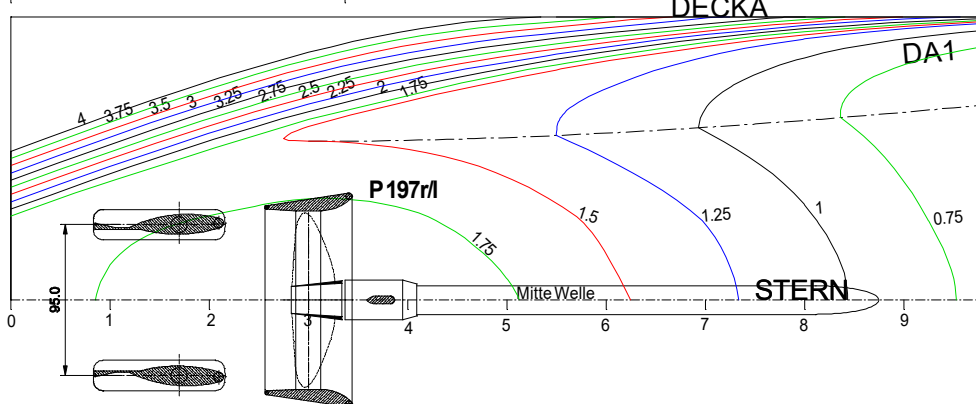
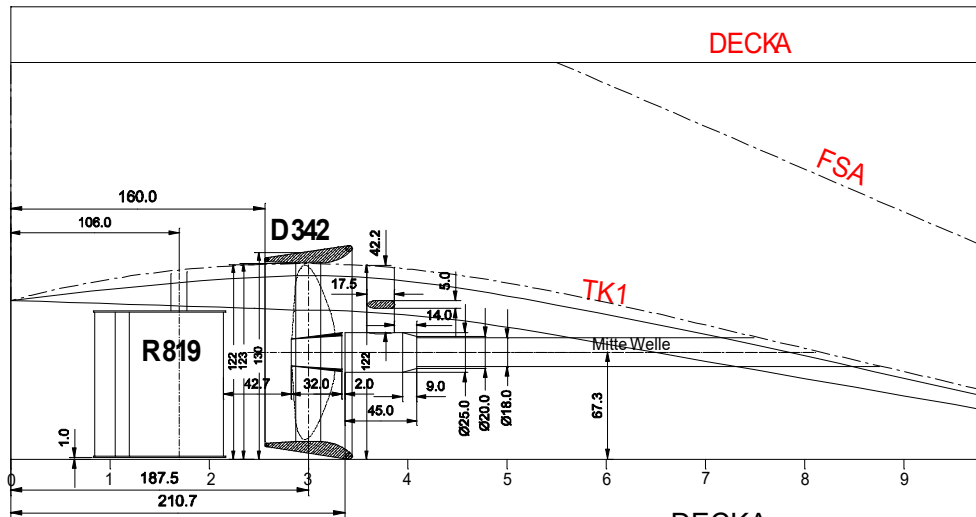
Länge Mittelrumpf = 6518.75 mm
Länge Hinterschiff = 1875.0 mm
Länge Mittelteil = 3125.0 mm
Länge Vorschiff = 1518.75 mm
Mittelrumpf Breite = 712.5 mm
Gesamt Breite a. Spt. = 1425.0 mm

T₁ = 175.0 mm
T₂ = 156.3 mm
T₃ = 150.0 mm
T₄ = 125.0 mm



Semikatamaran , Rheinschiff

Formvariante 1



Anordnungszeichnung

Model M1693 Basis 62.5

Scale 1 : 16

Semikat - Rheinschiff

Länge Seitenrumpf = 6875.0 mm

Seitenrumpf Breite = 356.25 mm

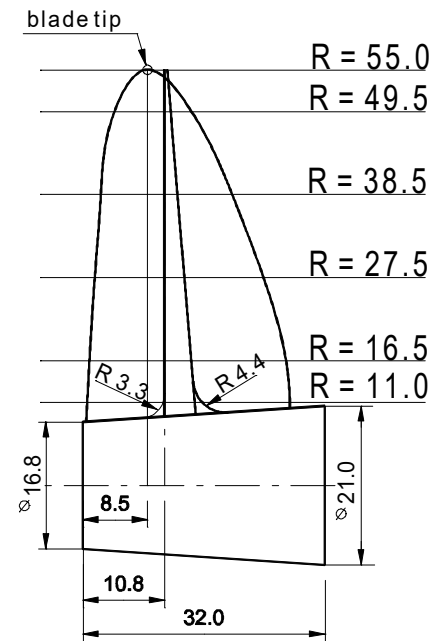
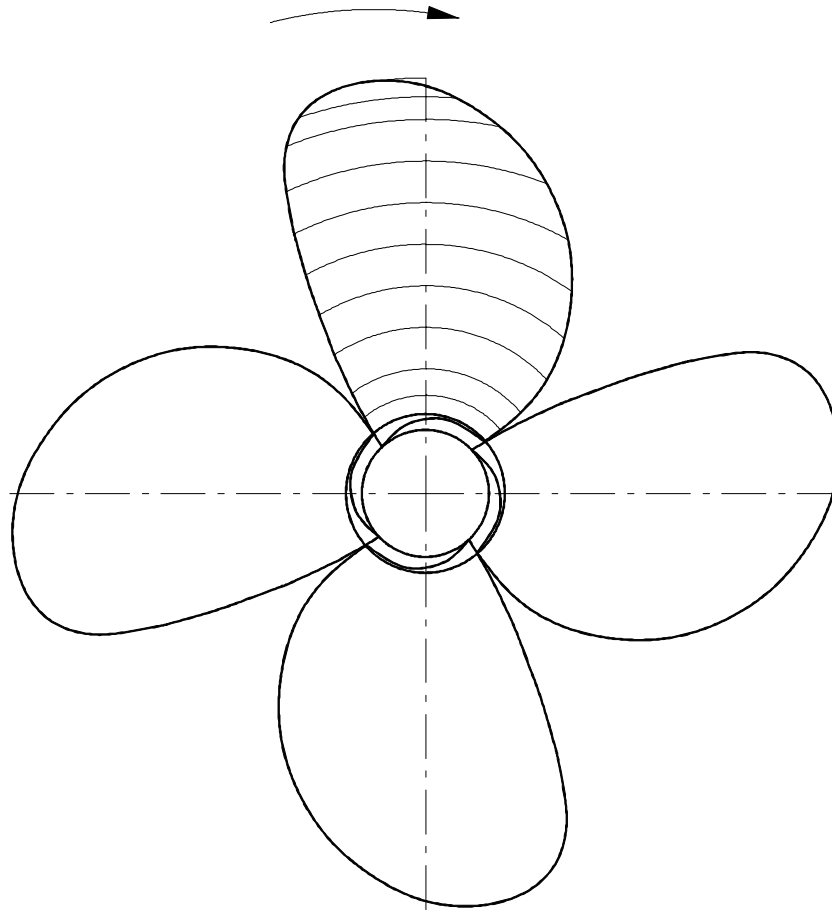
Länge Mittelrumpf = 6687.5 mm

Mittelrumpf Breite = 712.5 mm

Gesamt Breite a. Spt. = 1425.0 mm

TIEFGANG_k 156.25 mm

TIEFGANG_{max} 175.0 mm



P 197 r/I

propellertype: Wag.B 4.70

D = 110.00mm

P/D = 1.00

$A_E/A_0 = 0.70$

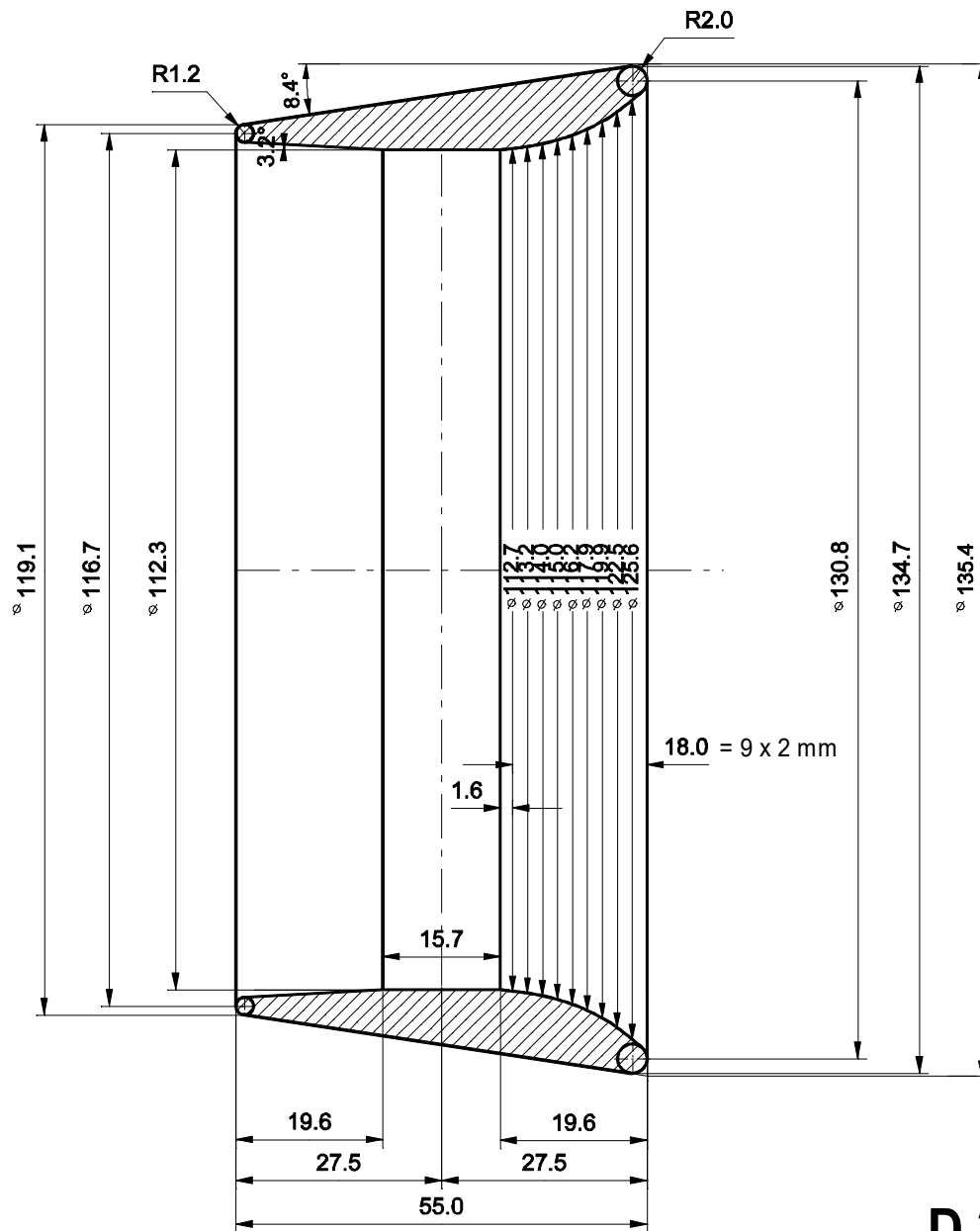
Z = 4

$C_{0,70R} = 41.28\text{mm}$

VBD



VBD. 2003 RÜCK

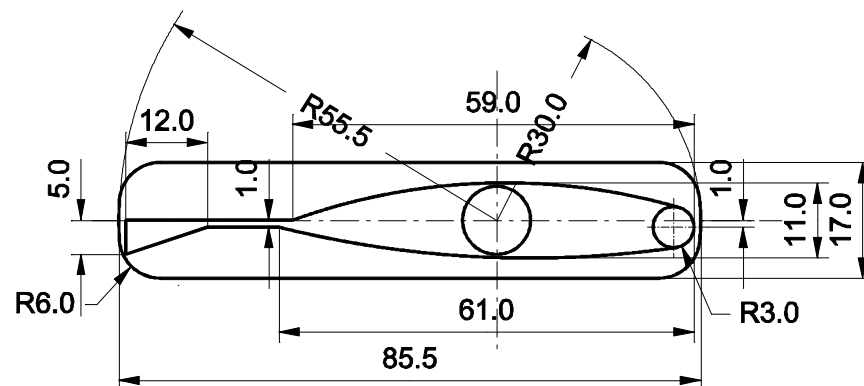
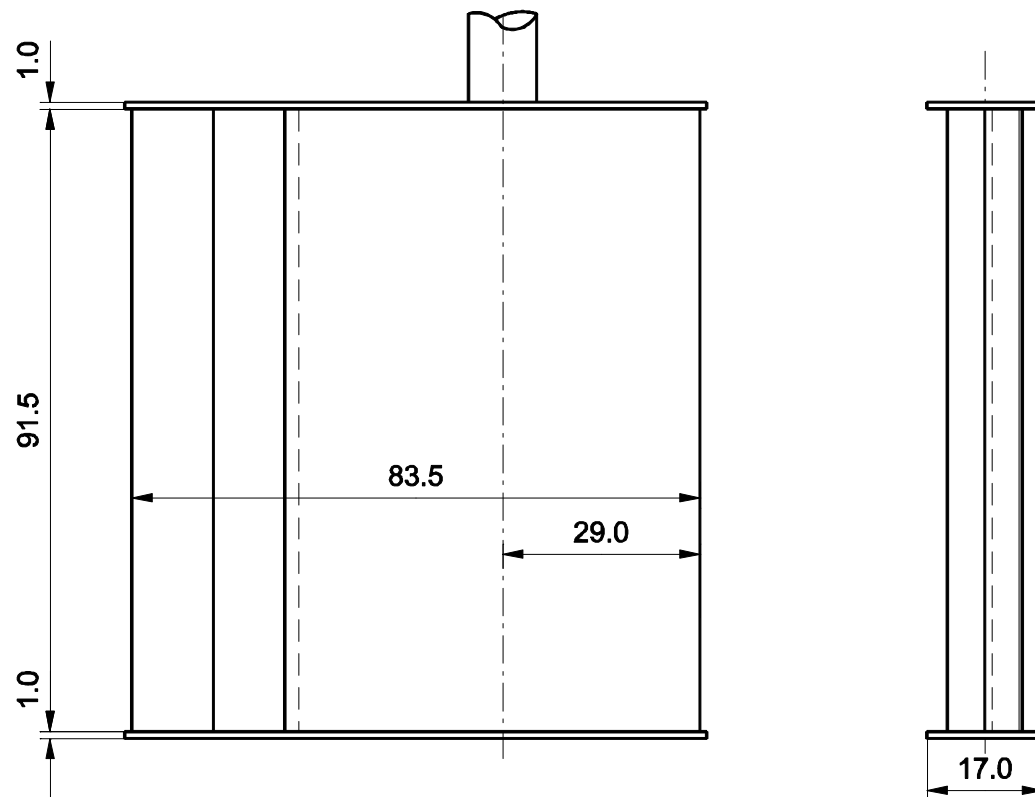


D 342

VBD



VBD.2003RÜCK



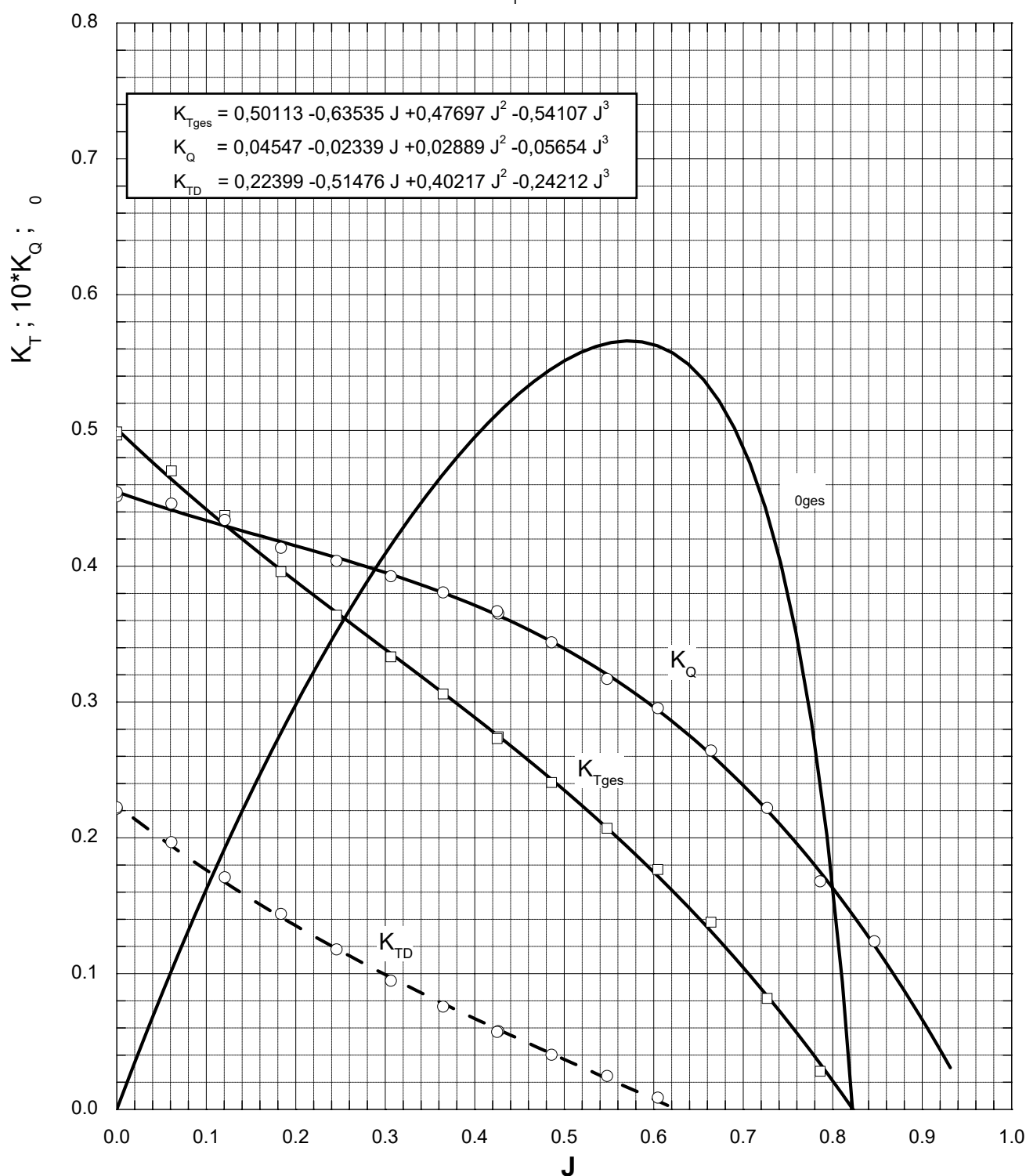
M 1 : 1 **2 Rudders for M 1693**
 1 x right, 1 x left
R 819

Propeller - Freifahrt

System: Propeller P197L + Düse D342

$n = 29,89 \text{ 1/s}$

$Rn_p = 2,71 - 2,93 \times 10^5$



Propeller P197L

$D = 0,11 \text{ m}$

$P/D = 1,00$

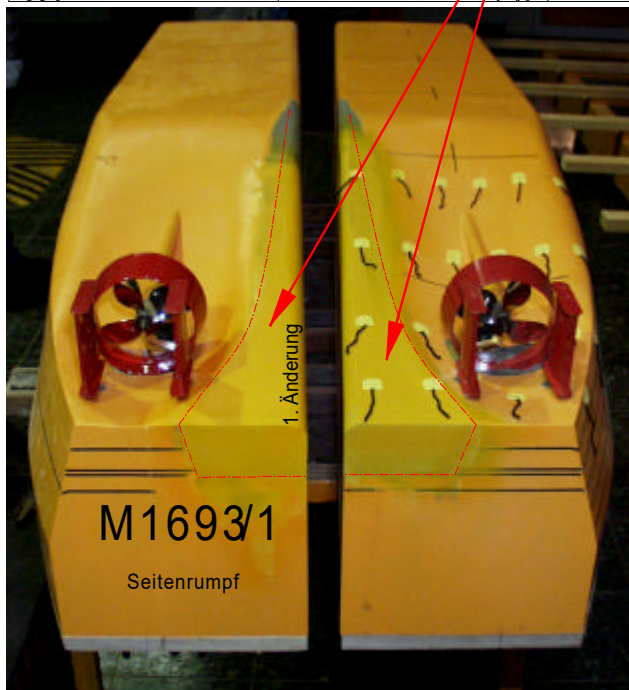
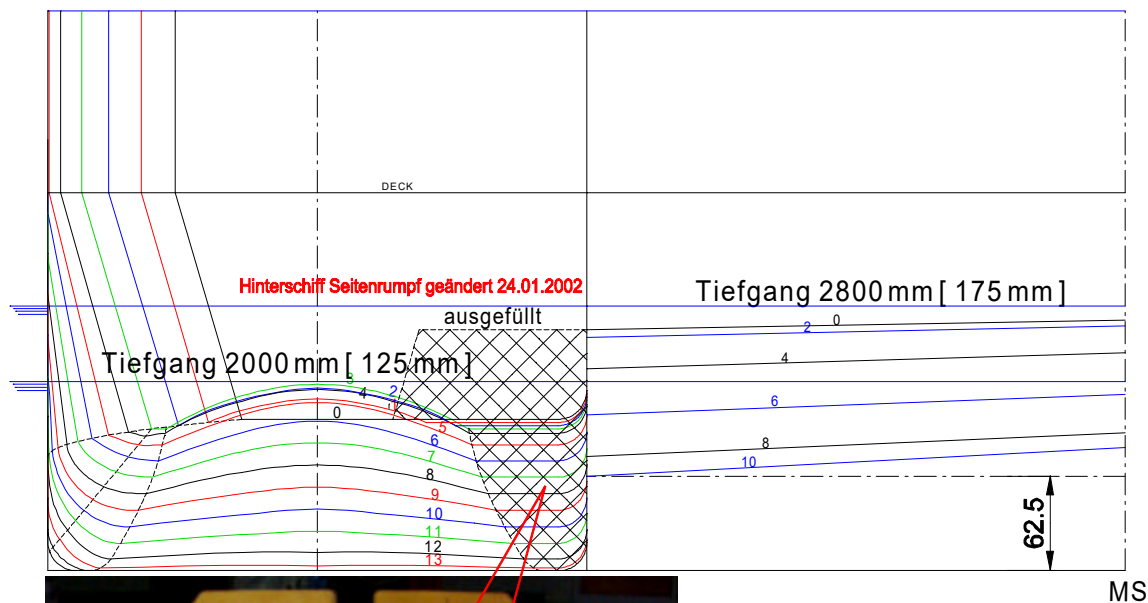
$A_E/A_0 = 0,70$

$Z = 4$

$c_{0,7R} = 0,0413 \text{ m}$

Semikatamaran , Rheinschiff

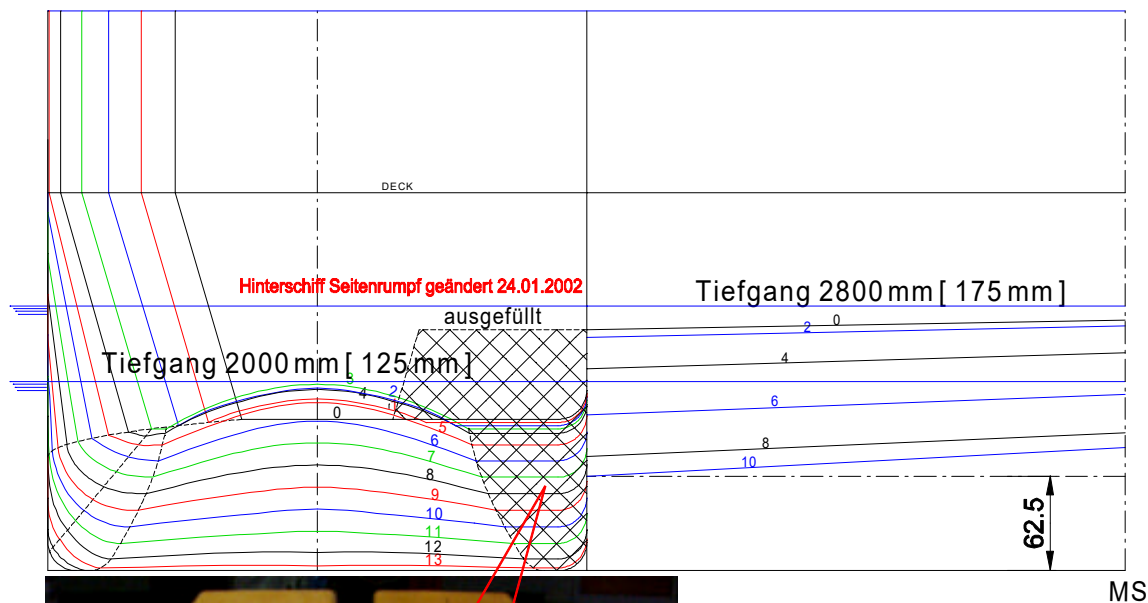
Formvariante 2



Model M1693 Basis 62.5
Scale 1 : 16

Semikatamaran , Rheinschiff

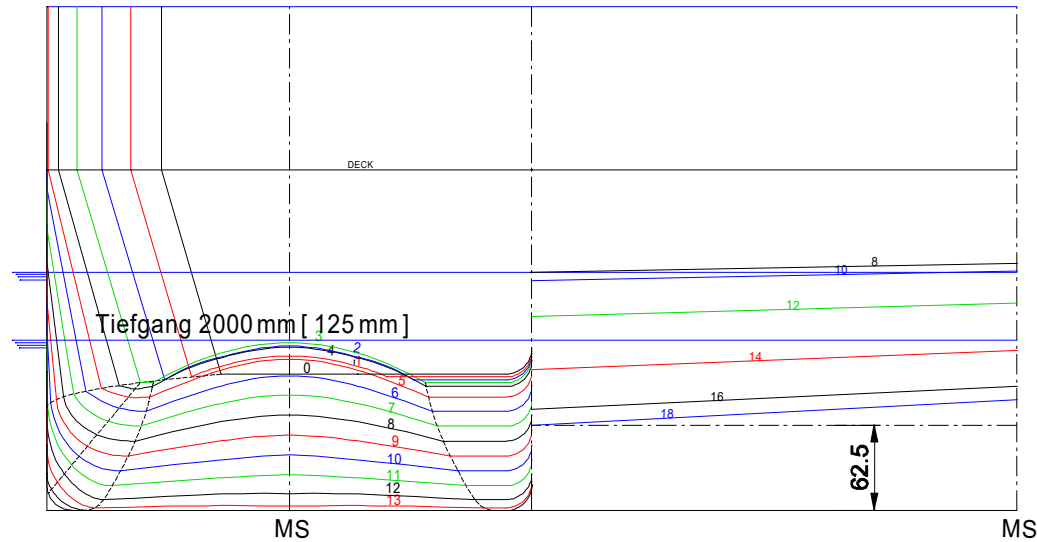
Formvariante 2



Model M1693 Basis 62.5
Scale 1 : 16

Semikatamaran , Rheinschiff

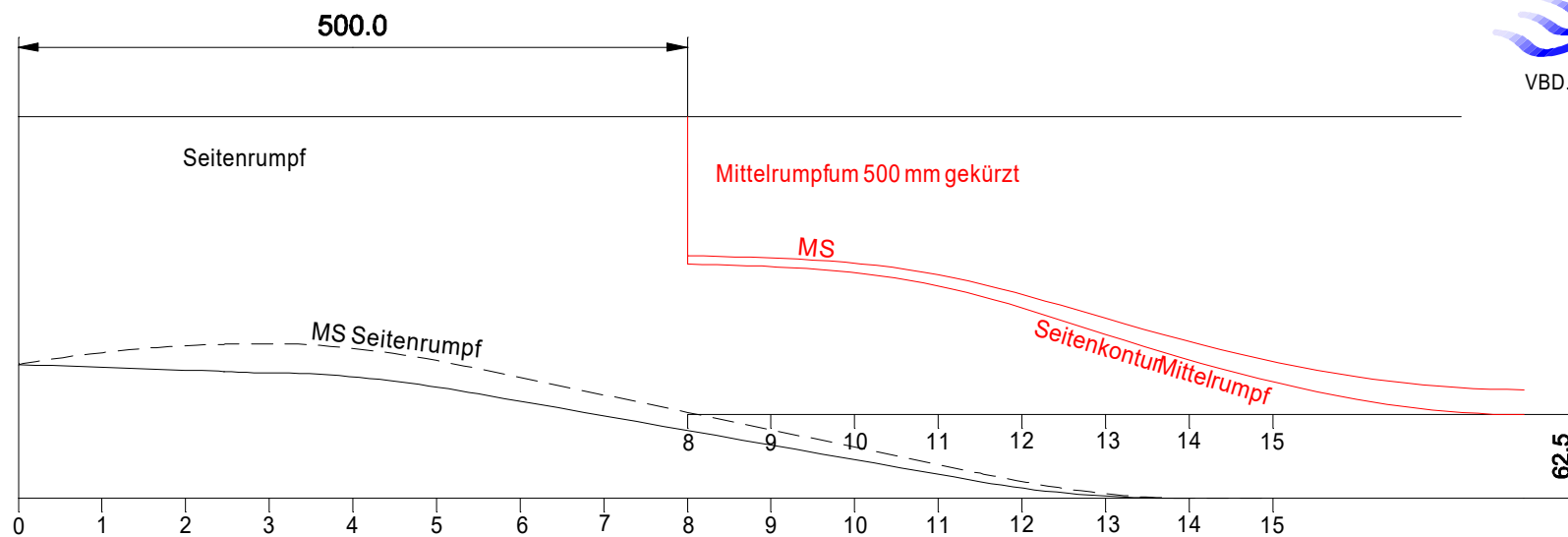
Formvariante 3



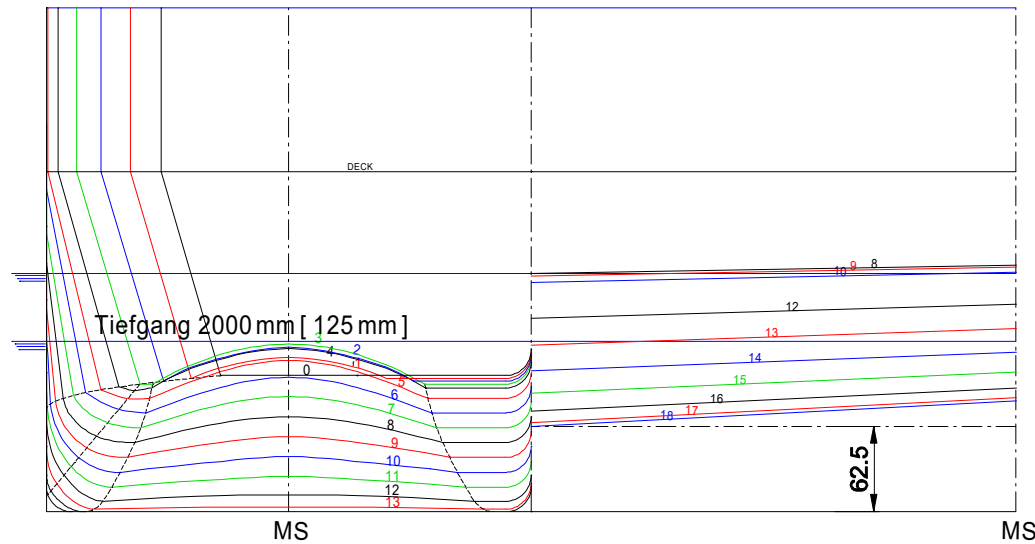
Model M1693 Basis 62.5
Scale 1 : 16

Länge Seitenrumpf = 6875.0 mm
 Seitenrumpf Breite = 356.25 mm
 Länge Mittelrumpf = 6018.75 mm
 Mittelrumpf Breite = 712.5 mm
 Gesamt Breite a. Spt. = 1425.0 mm
 Bauspt. Abstand = 62.5 mm

TIEFGANG_{max.} 175.0 mm

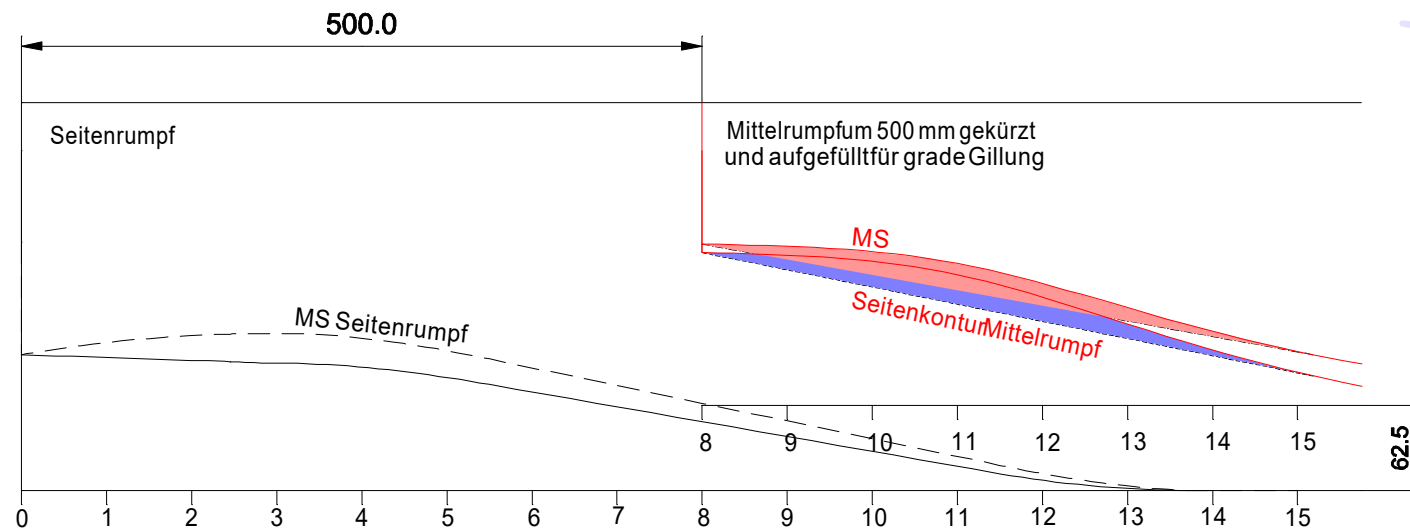


Semikatamaran , Rheinschiff Formvariante 4



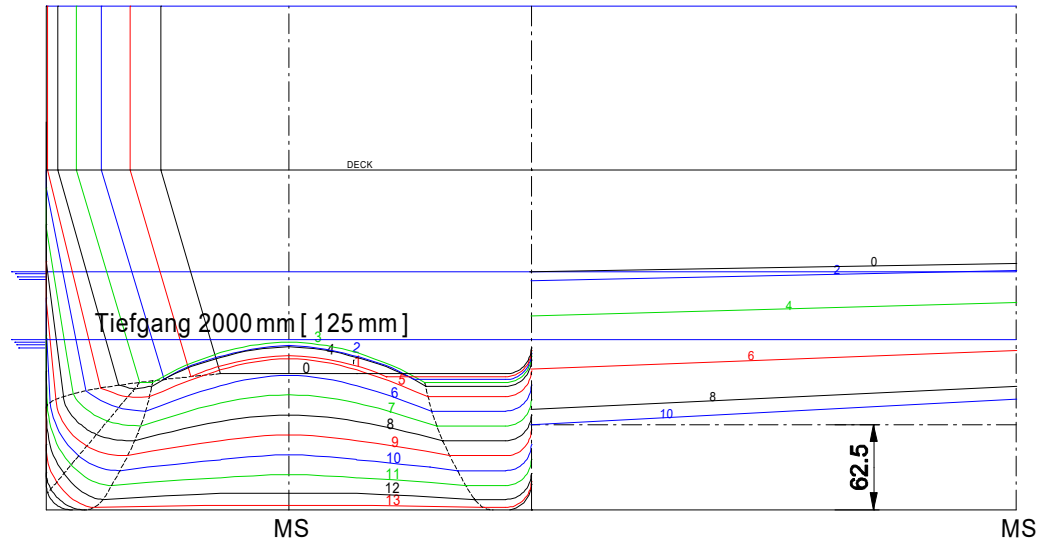
Model M1693 Basis 62.5
Scale 1 : 16

Länge Seitenrumpf = 6875.0 mm
Seitenrumpf Breite = 356.25 mm
Länge Mittelrumpf = 6018.75 mm
Mittelrumpf Breite = 712.5 mm
Gesamt Breite a. Spt. = 1425.0 mm
Bauspt. Abstand = 62.5 mm
TIEFGANG_{max.} 175.0 mm



Semikatamaran , Rheinschiff

Formvariante 5



Model M1693 Basis 62.5

Scale 1 : 16

Länge Seitenrumpf = 6875.0 mm

Seitenrumpf Breite = 356.25 mm

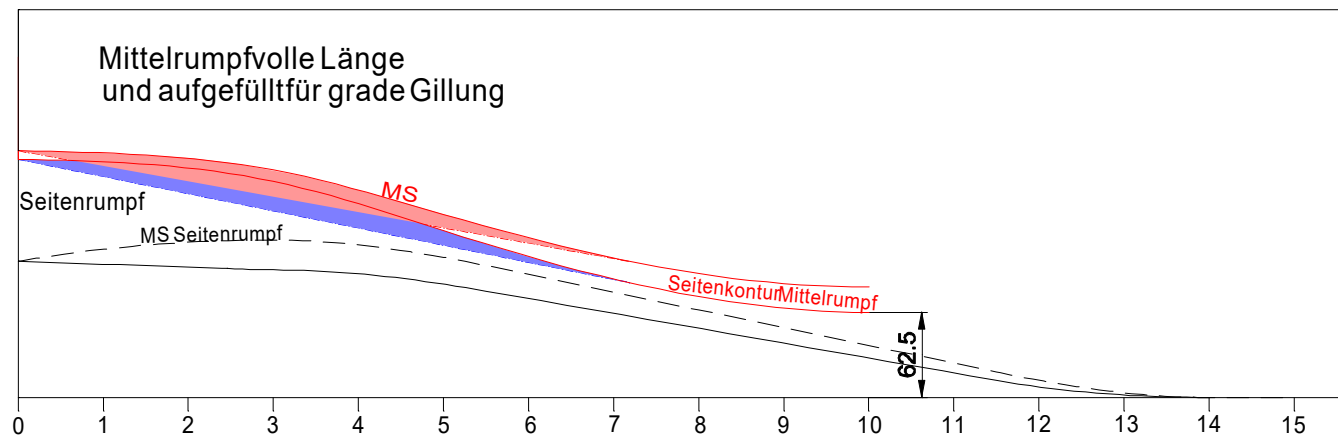
Länge Mittelrumpf = 6018.75 mm

Mittelrumpf Breite = 712.5 mm

Gesamt Breite a. Spt. = 1425.0 mm

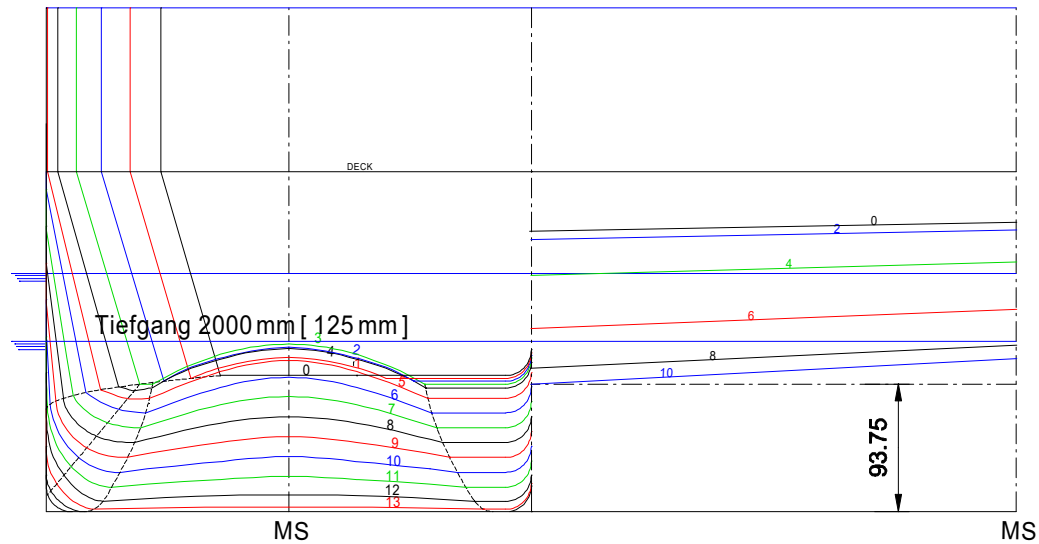
Bauspt. Abstand = 62.5 mm

TIEFGANG_{max.} 175.0 mm



Semikatamaran , Rheinschiff

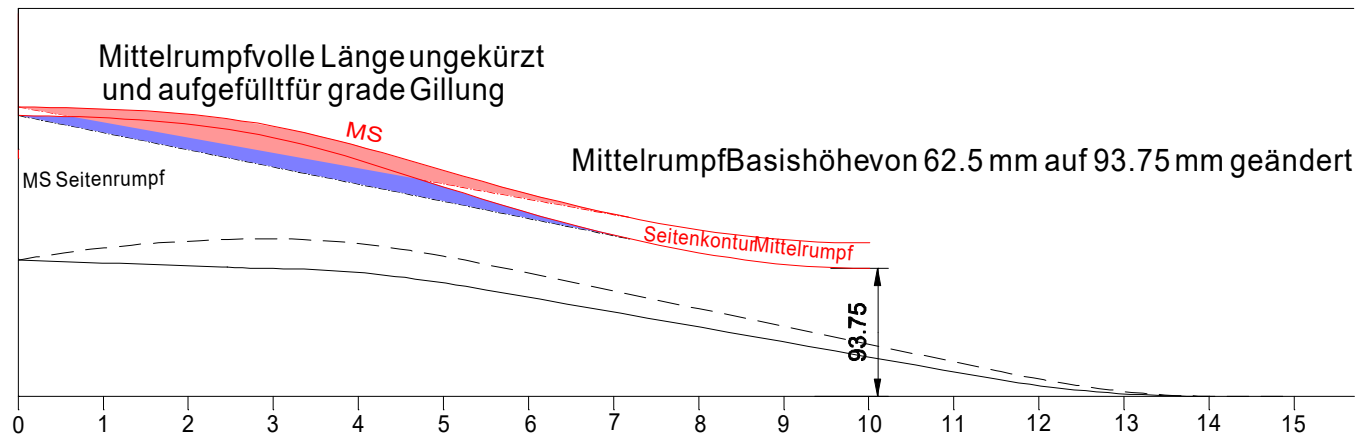
Formvariante 5a



Model M1693 Basis 62.5
Scale 1 : 16

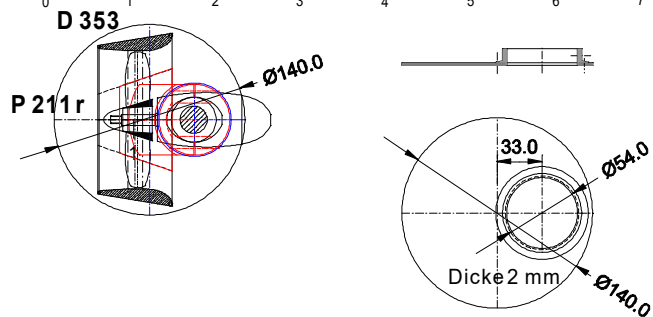
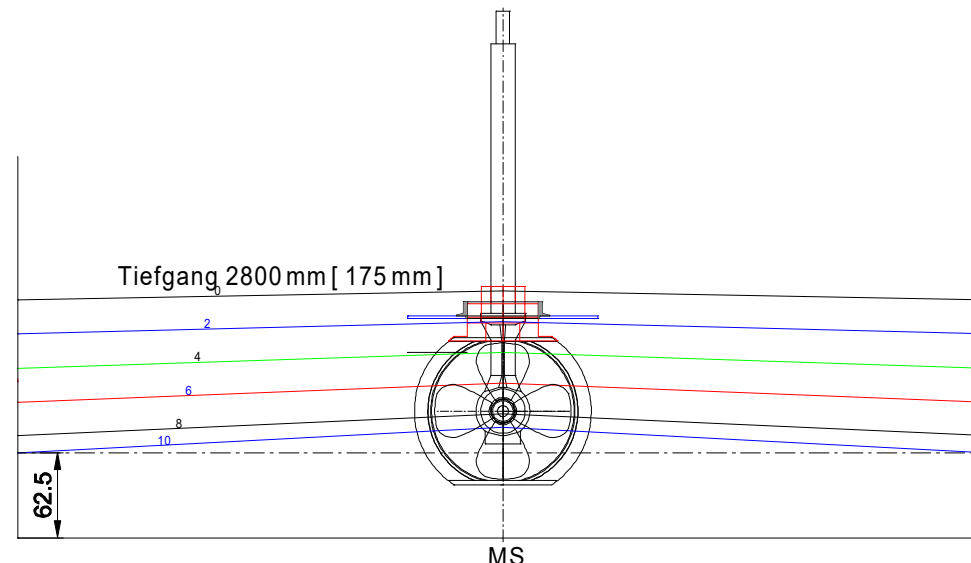
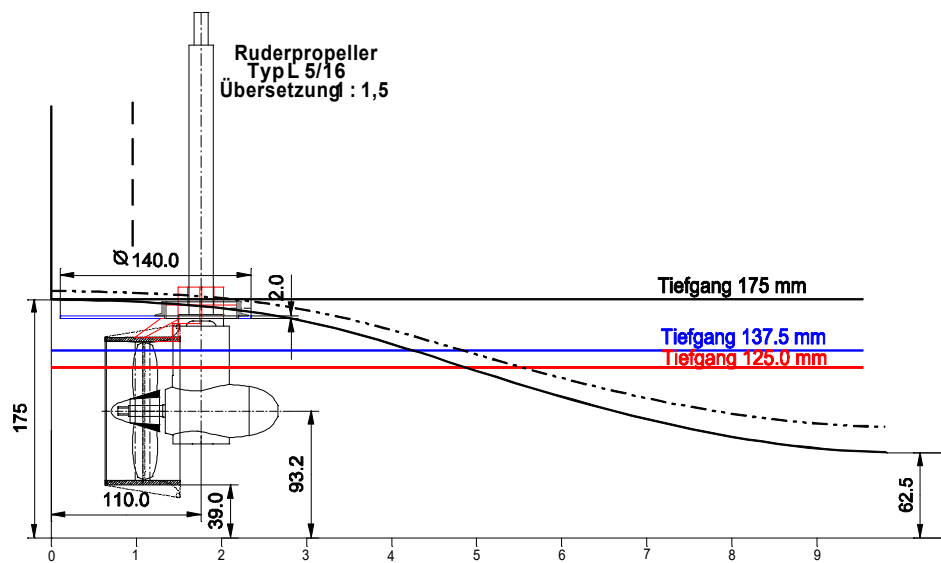
Länge Seitenrumpf = 6875.0 mm
 Seitenrumpf Breite = 356.25 mm
 Länge Mittelrumpf = 6018.75 mm
 Mittelrumpf Breite = 712.5 mm
 Gesamt Breite a. Spt. = 1425.0 mm
 Bauspt. Abstand = 62.5 mm

TIEFGANG_{max.} 175.0 mm



Semikatamaran , Rheinschiff

Formvariante 6



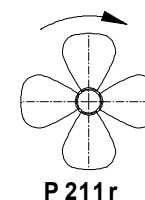
Anordnungszeichnung

Model M1693 Mittelrumpf

Scale 1 : 16

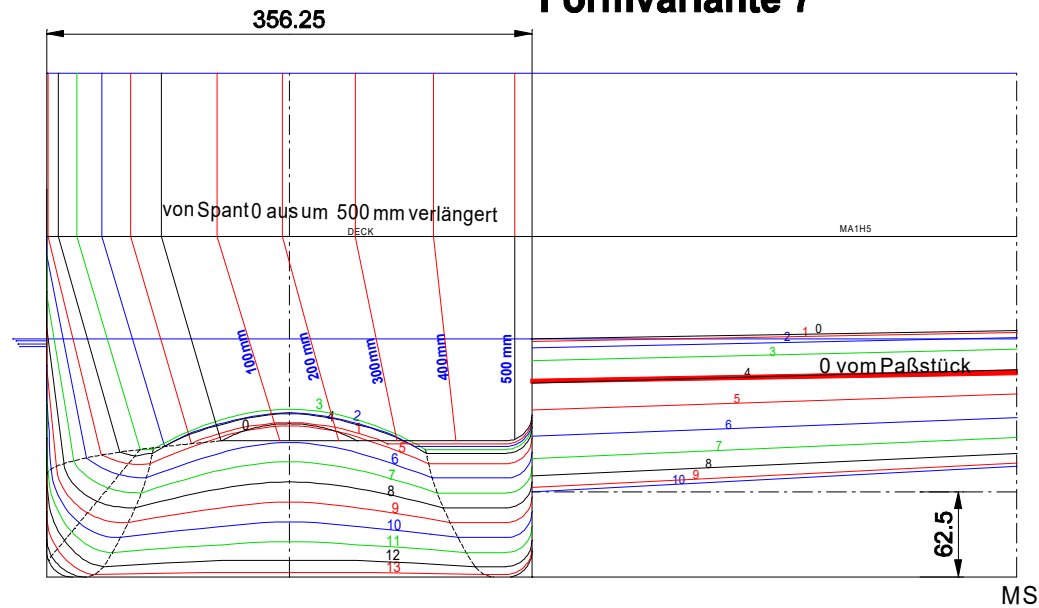
Länge Seitenrumpf = 6875.0 mm
 Seitenrumpf Breite = 356.25 mm
 Länge Mittelrumpf = 6018.75 mm
 Mittelrumpf Breite = 712.5 mm
 Gesamt Breite a. Spt. = 1425.0 mm
 Bauspt. Abstand = 62.5 mm

TIEFGANG_k = 156.25 mm
 TIEFGANG_{max} = 175.0 mm



Semikatamaran , Rheinschiff

Formvariante 7



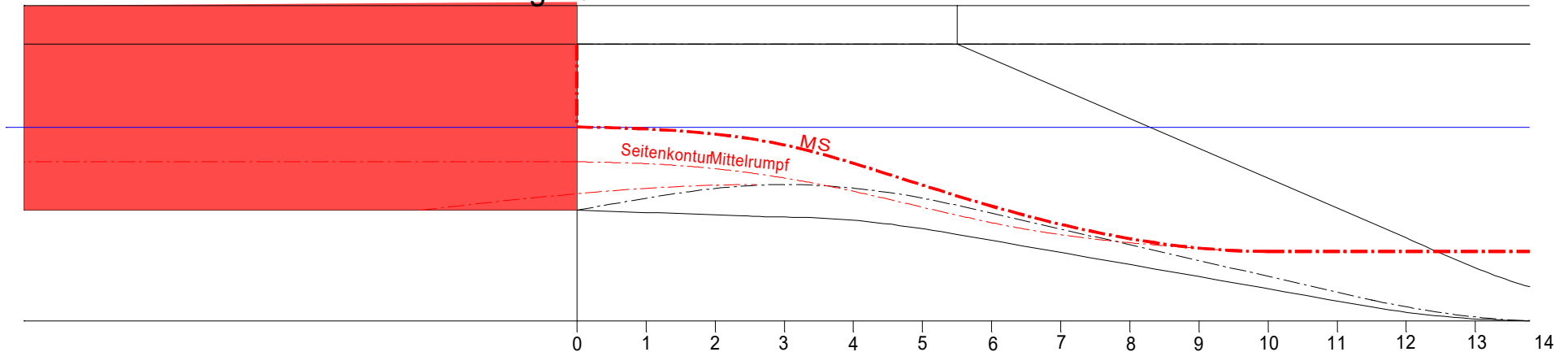
Model M1693 Basis 62.5
Scale 1 : 16

Länge Seitenrumpf = 6875.0 mm
 Seitenrumpf Breite = 356.25 mm
 Länge Mittelrumpf = 6018.75 mm
 Mittelrumpf Breite = 712.5 mm
 Gesamt Breite a. Spt. = 1425.0 mm
 Bauspt. Abstand = 62.5 mm

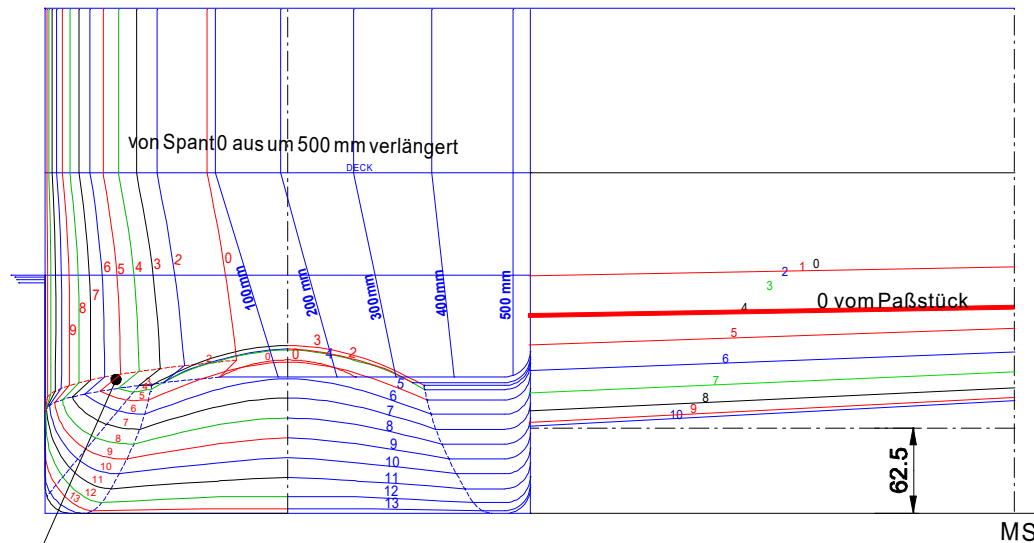
TIEFGANG max. 175.0 mm



von Spant0 aus um 500 mm verlängert



Semikatamaran , Rheinschiff Formvariante 8



Model M1693 Basis 62.5
Scale 1 : 16

Länge Seitenrumpf = 6875.0 mm
Seitenrumpf Breite = 356.25 mm
Länge Mittelrumpf = 6018.75 mm
Mittelrumpf Breite = 712.5 mm
Gesamt Breite a. Spt. = 1425.0 mm
Bauspt. Abstand = 62.5 mm

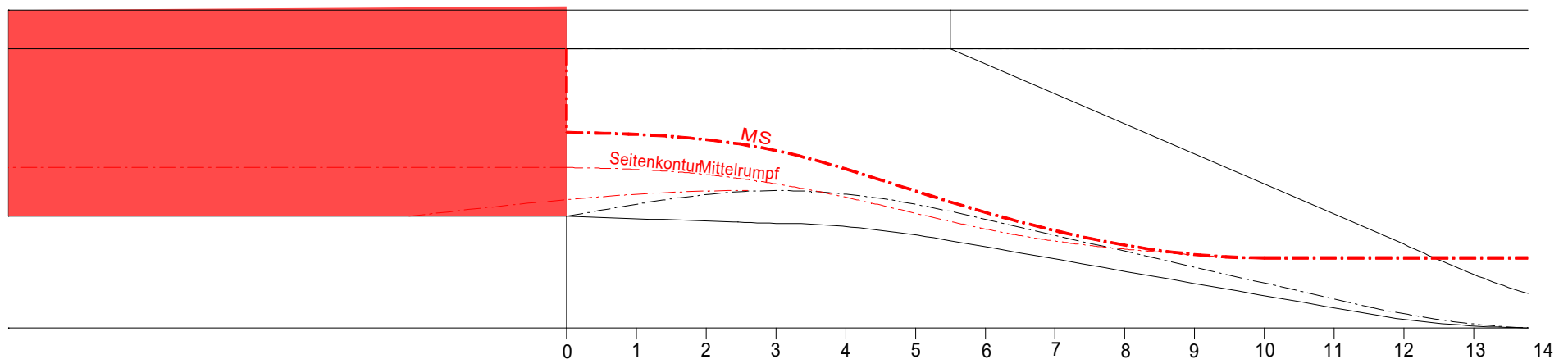
TIEFGANG_{max.} 175.0 mm

VBD



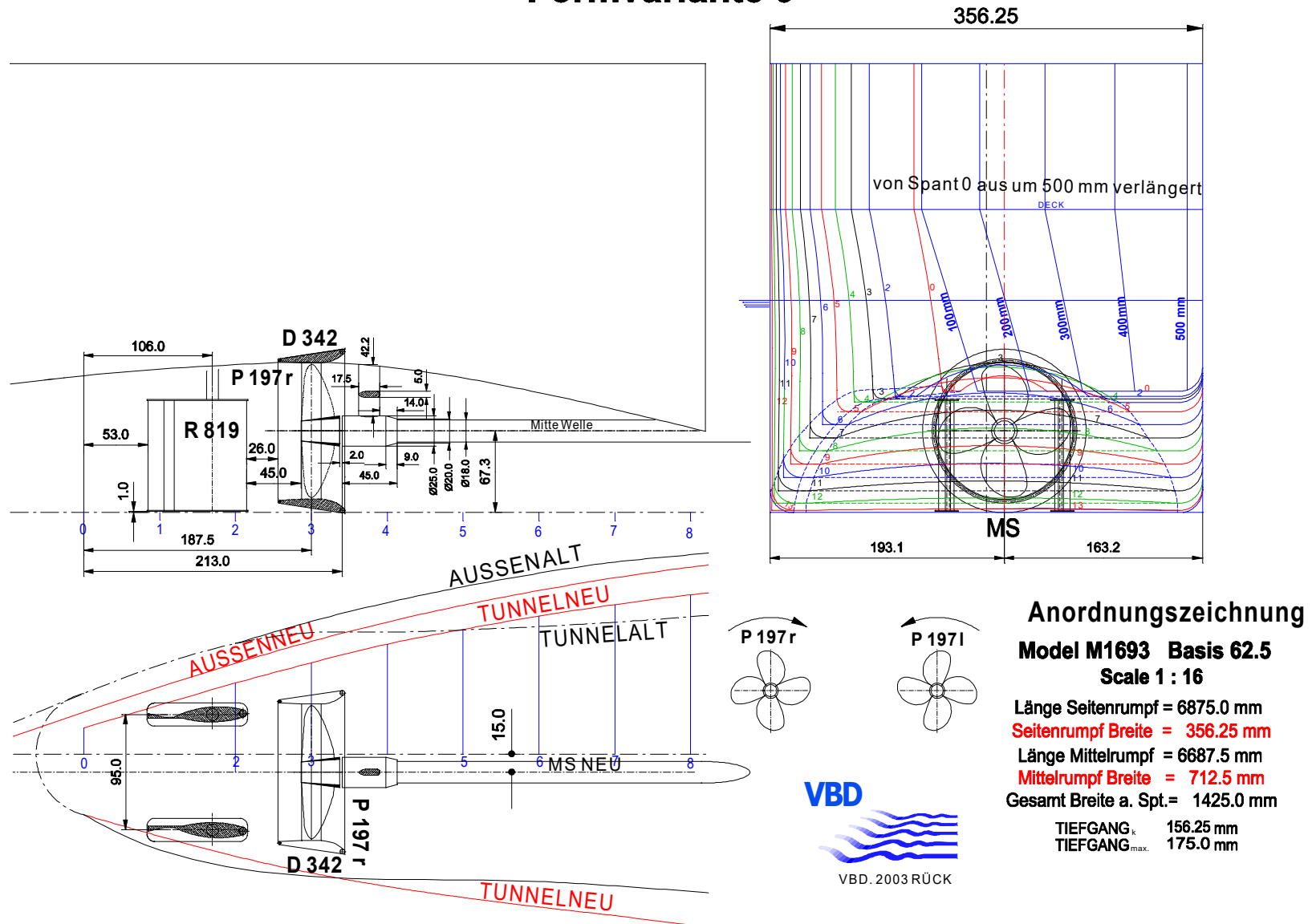
VBD.2003RÜCK

Heck Seitenrumpf an der Schulter
verschlankt, überkragend



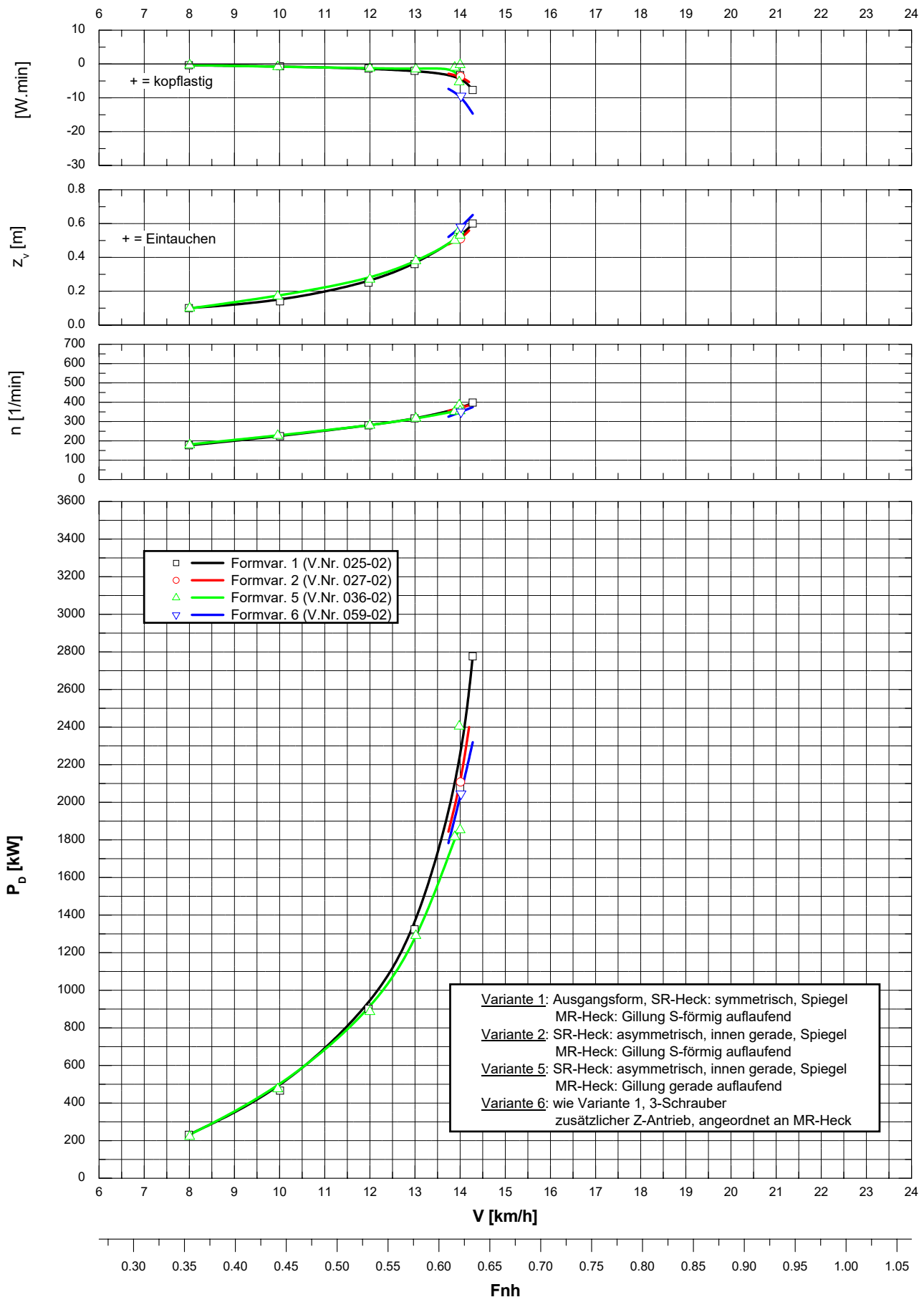
Semikatamaran , Rheinschiff

Formvariante 9

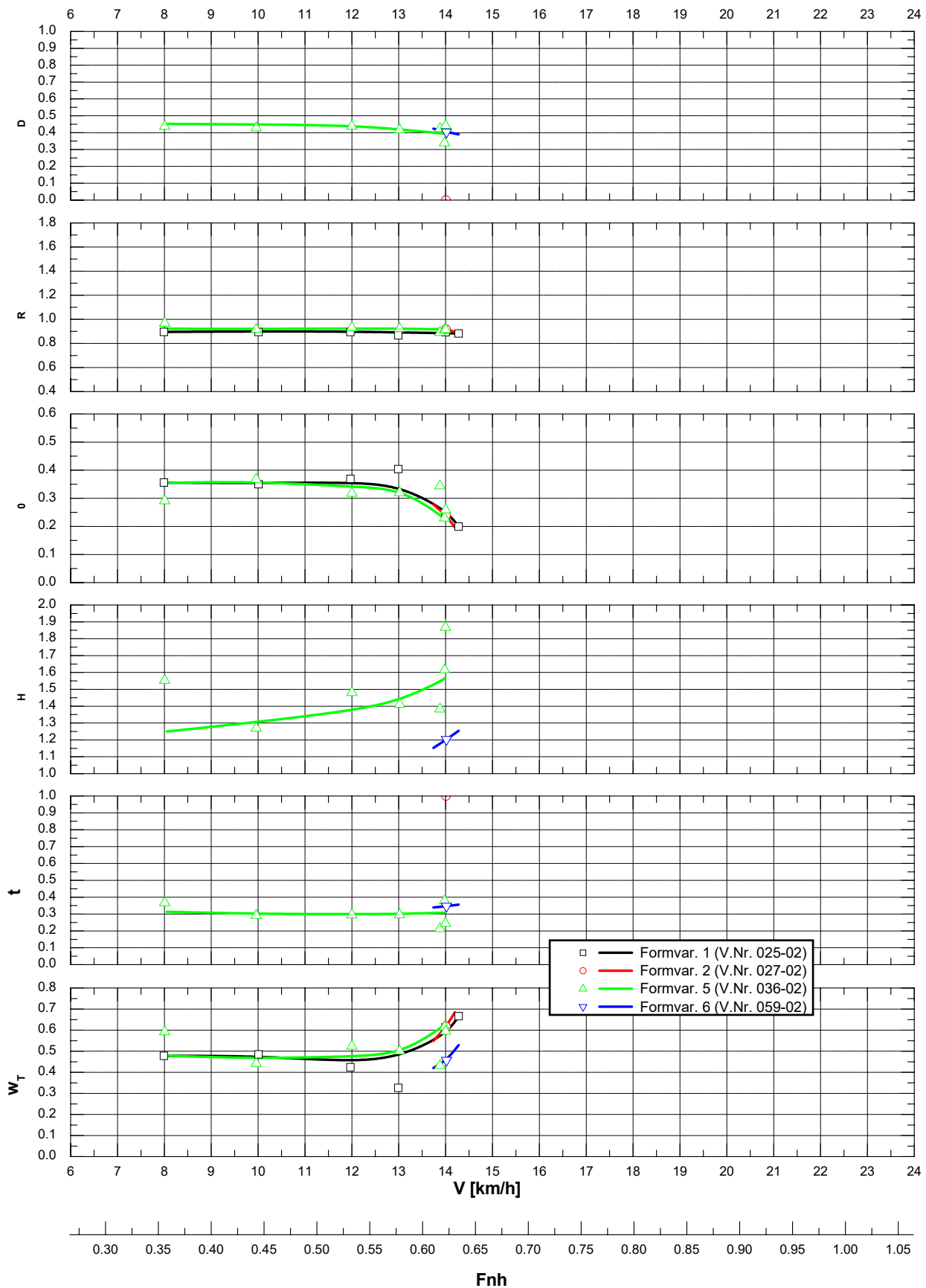


Propulsion - Formvariation -
 Semikat. (Rheinschiff), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$; $T = 2,8 \text{ m}$
 seitr. unbegr. Fahrwasser

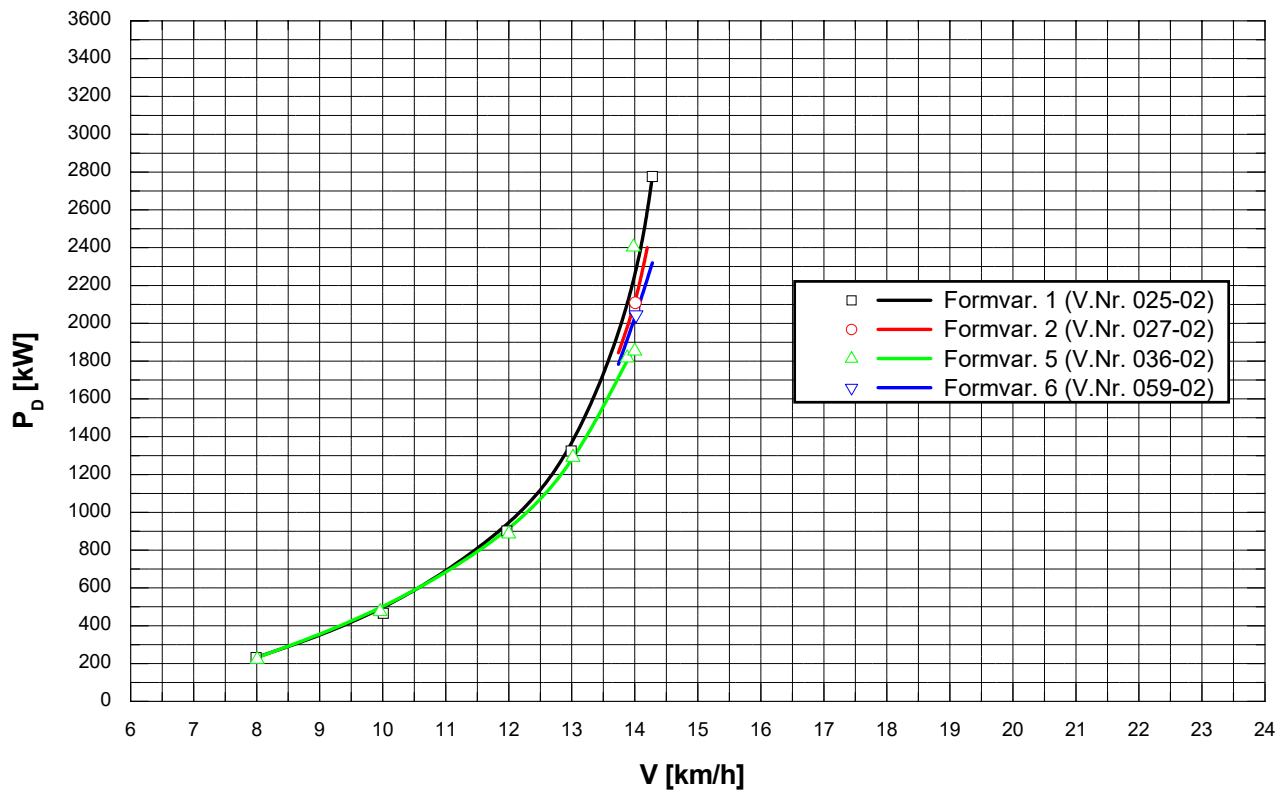
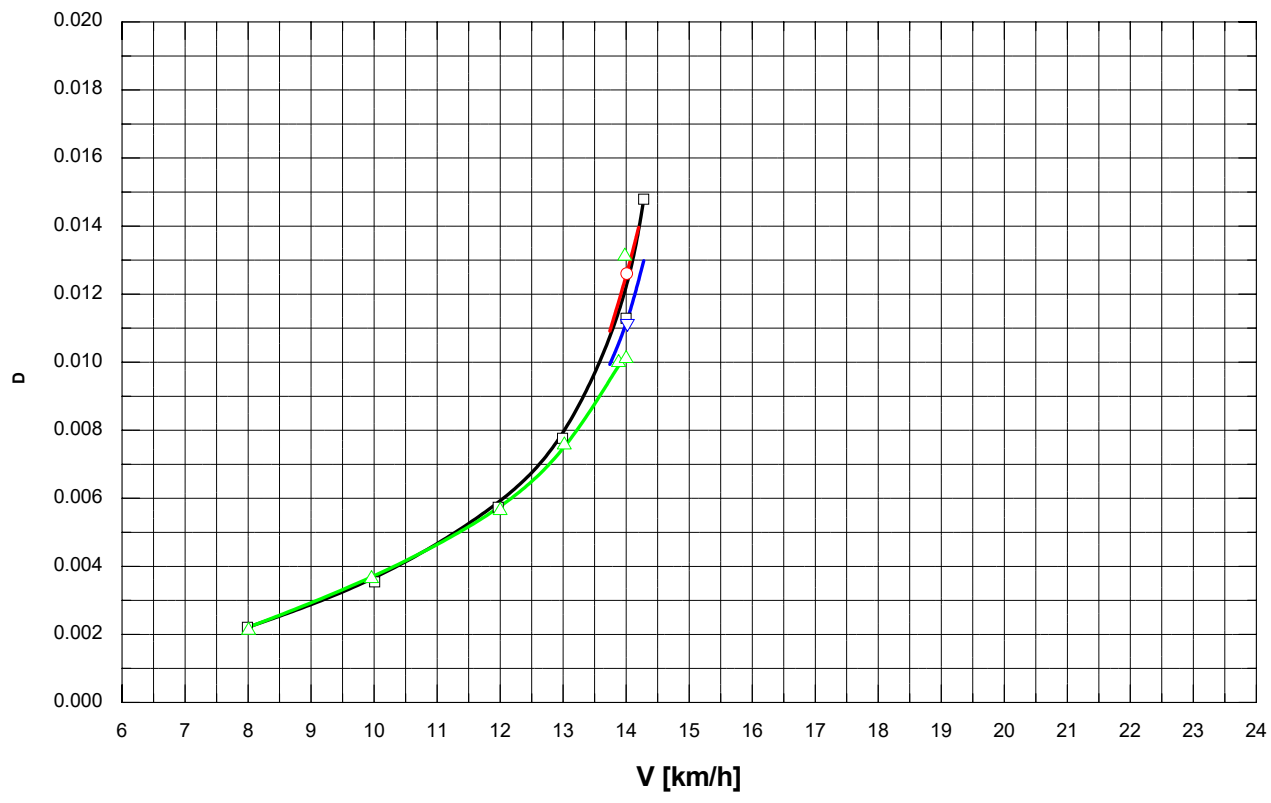
Blatt 1 von 3



Propulsion - Formvariation -
 Semikat. (Rheinschiff), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$; $T = 2,8 \text{ m}$
 seittl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 3



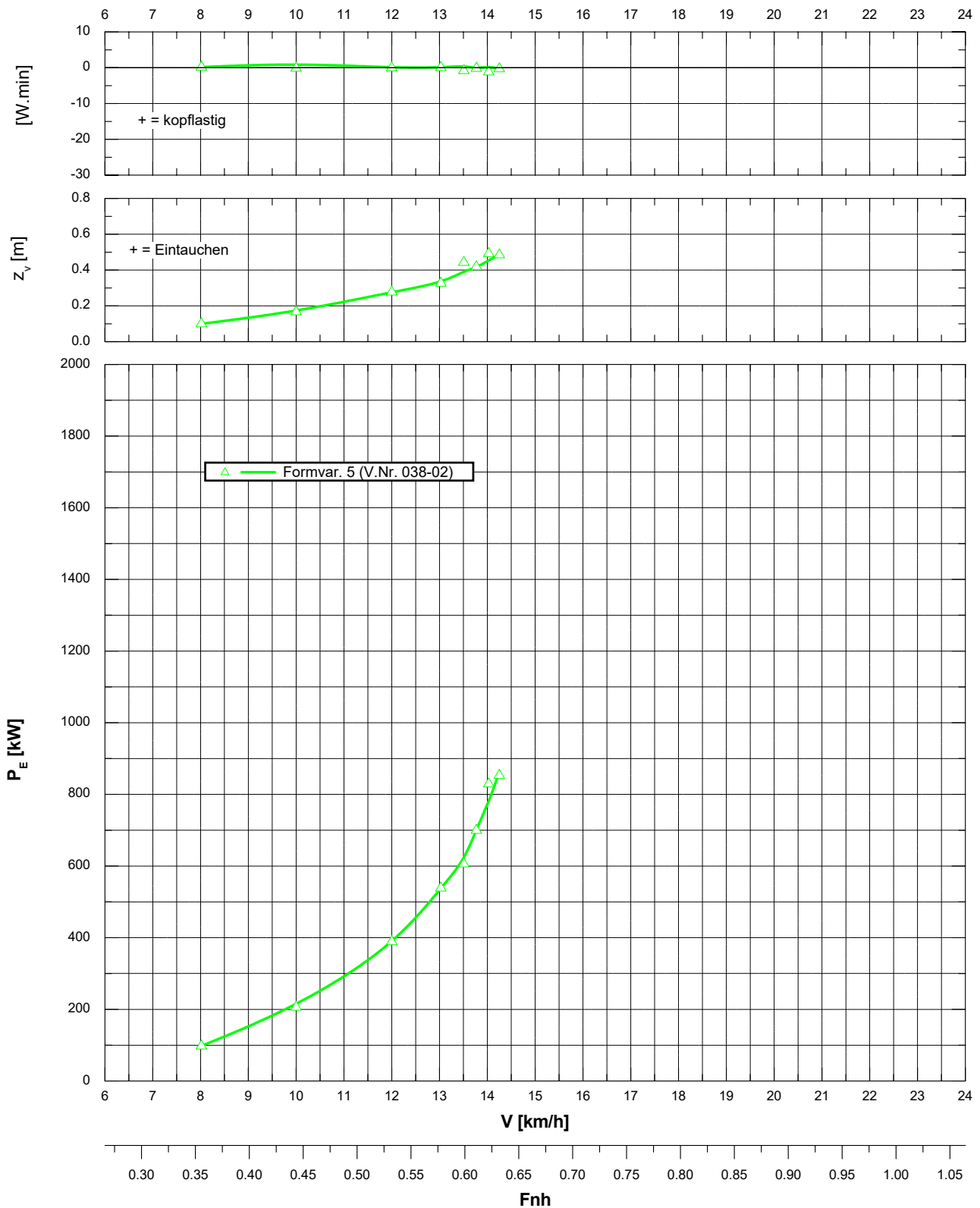
Propulsion - Formvariation -
 Spezifische Leistung
 Semikat. (Rheinschiff), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$; $T = 2,8 \text{ m}$
 seittl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 3 von 3



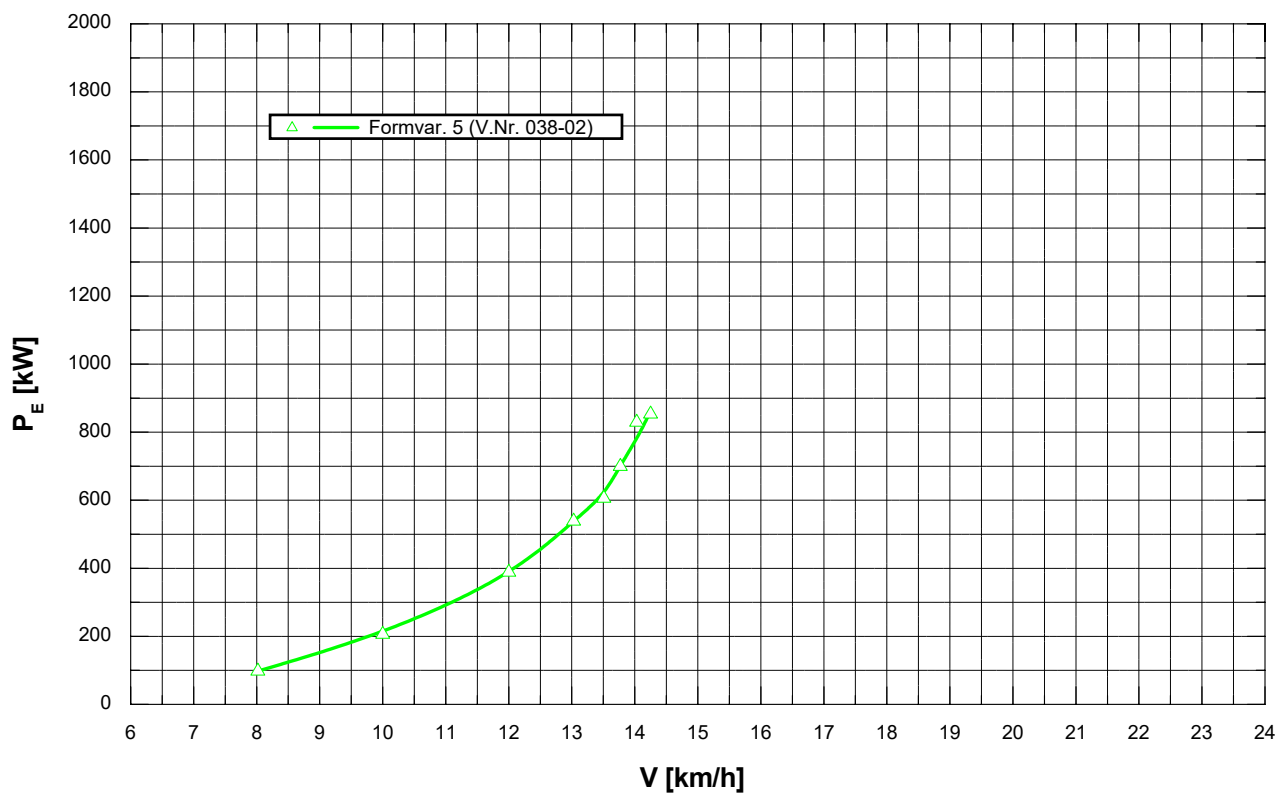
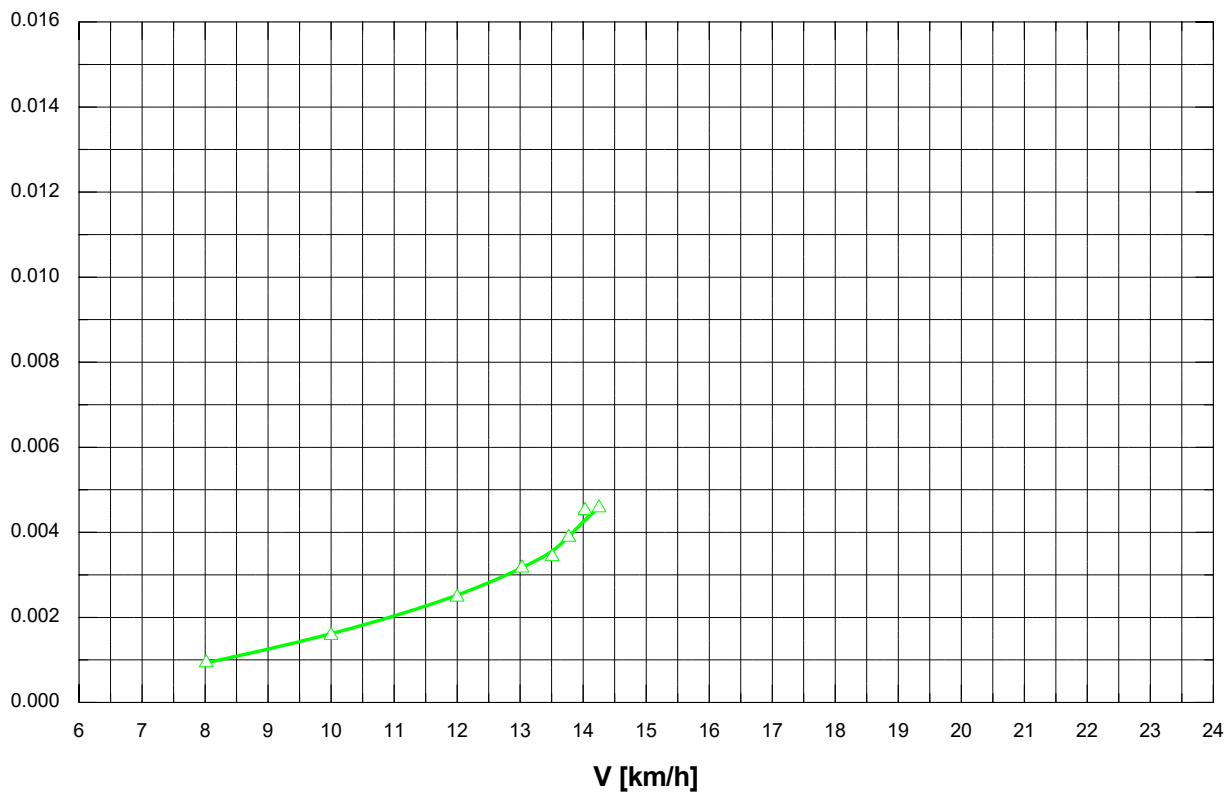
Widerstand - Formvariation -
Semikat. (Rheinschiff), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

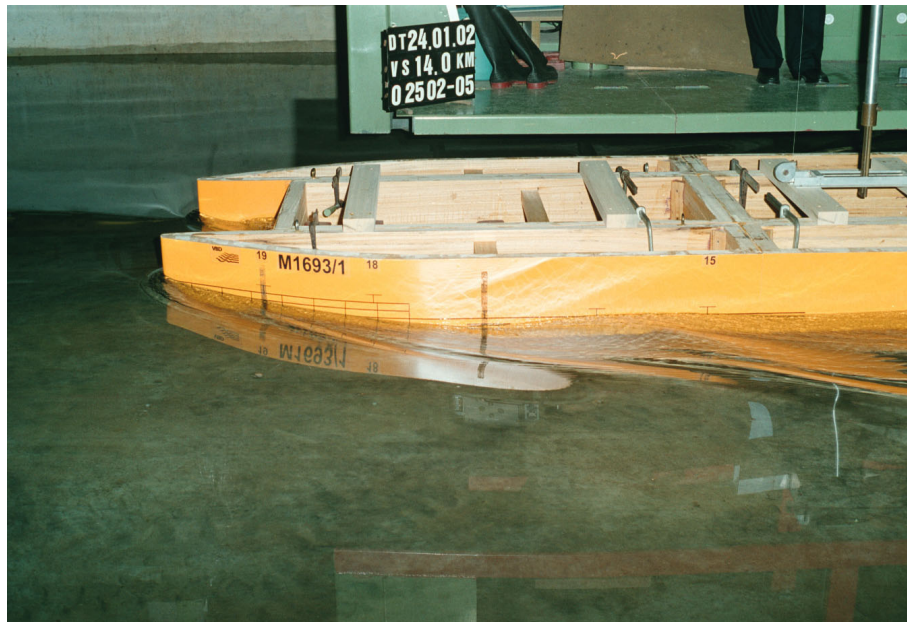
$h = 4,0 \text{ m}$; $T = 2,8 \text{ m}$
seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 1 von 2

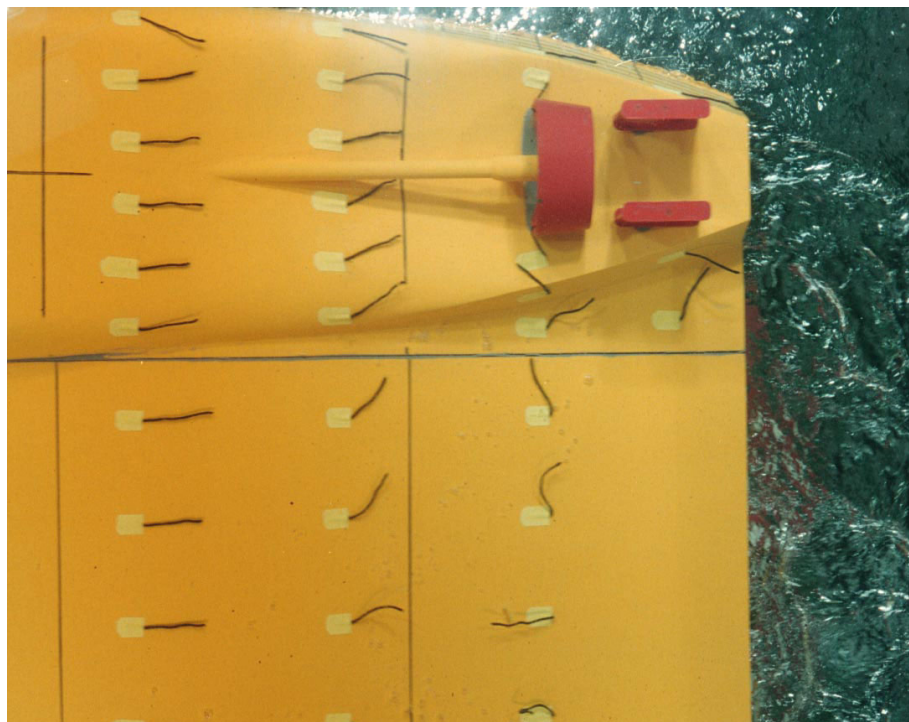


Widerstand - Formvariation -
Spezifischer Widerstand
 Semikat. (Rheinschiff), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$
 seitl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 2

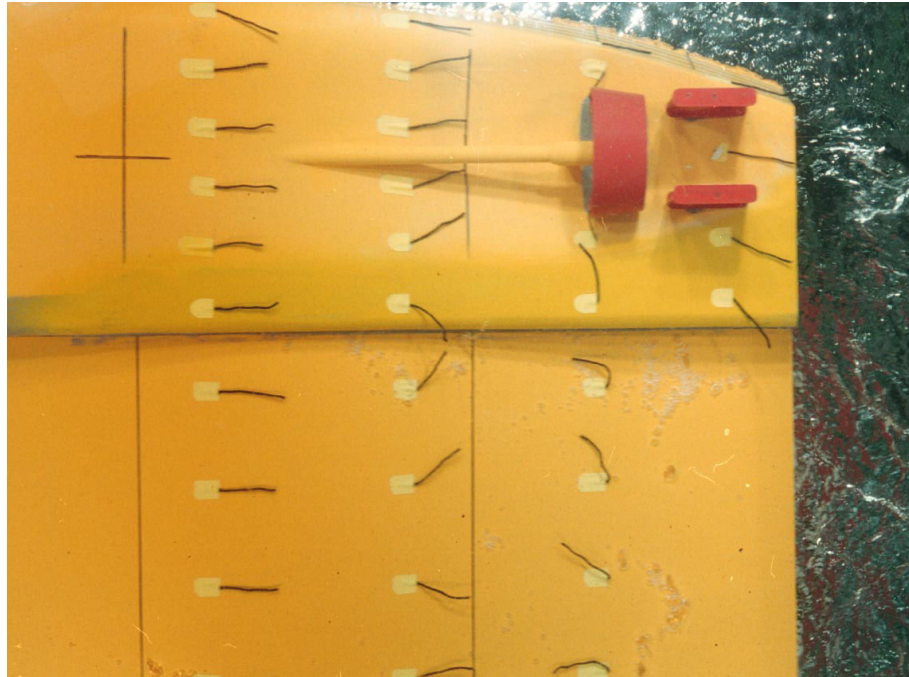




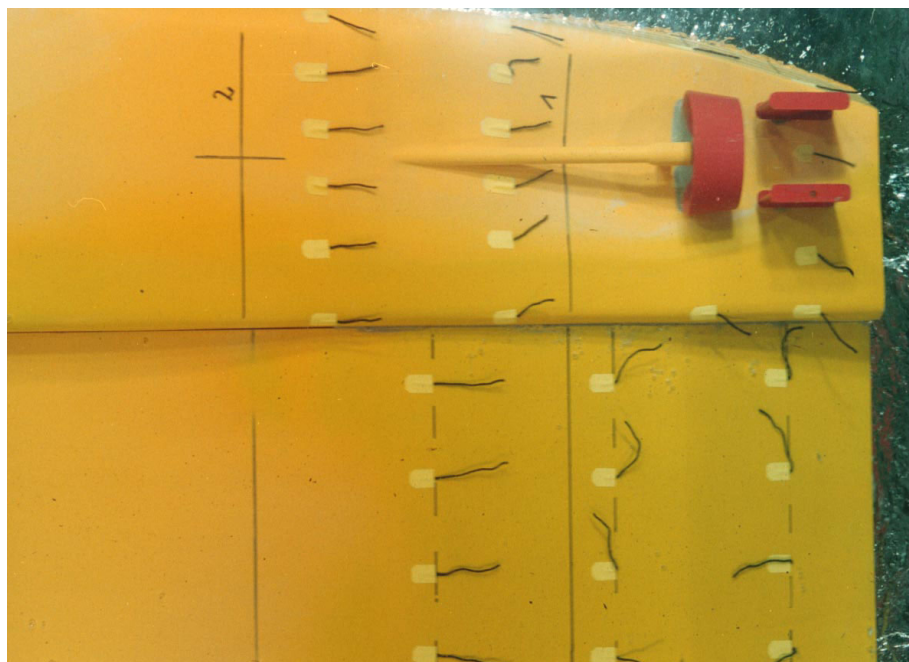
Rheinschiff, Formvariante 1,
Propulsion, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 025-02-05)



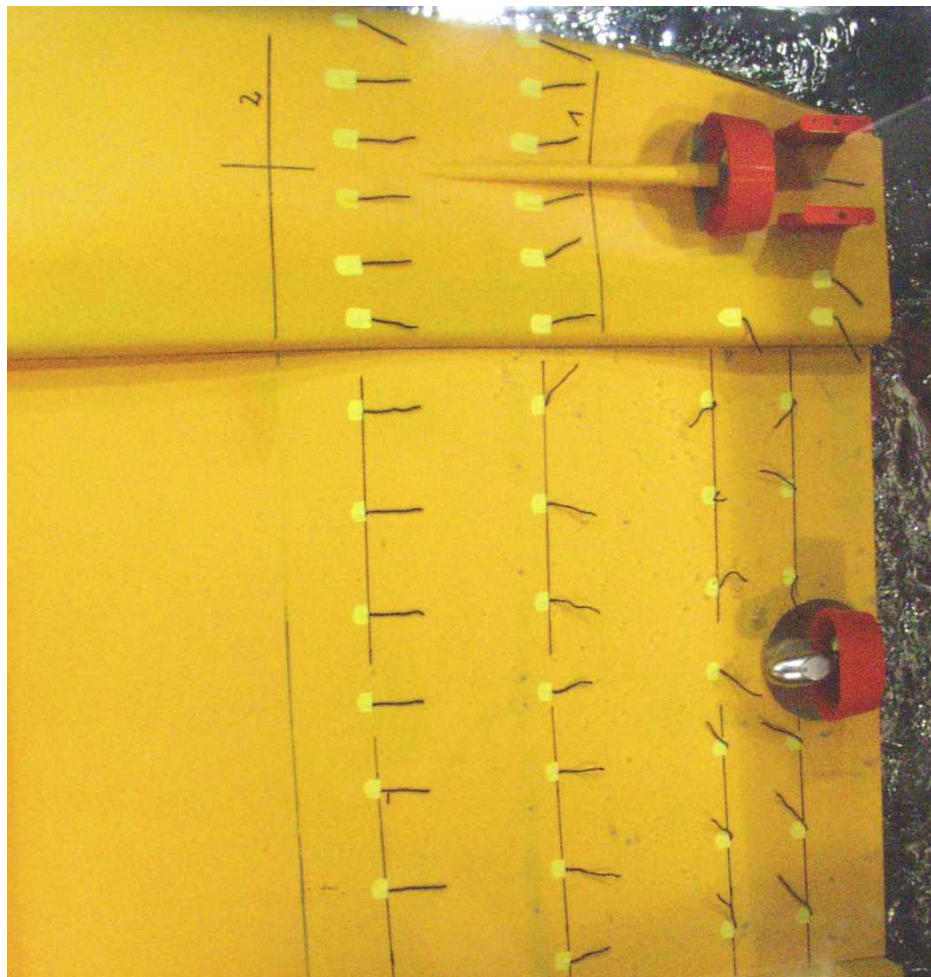
Rheinschiff, Formvariante 1,
Propulsion, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 025-02-07),
MR-Heckgillung S-förmig



Rheinschiff, Formvariante 2,
Propulsion, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 027-02-01)



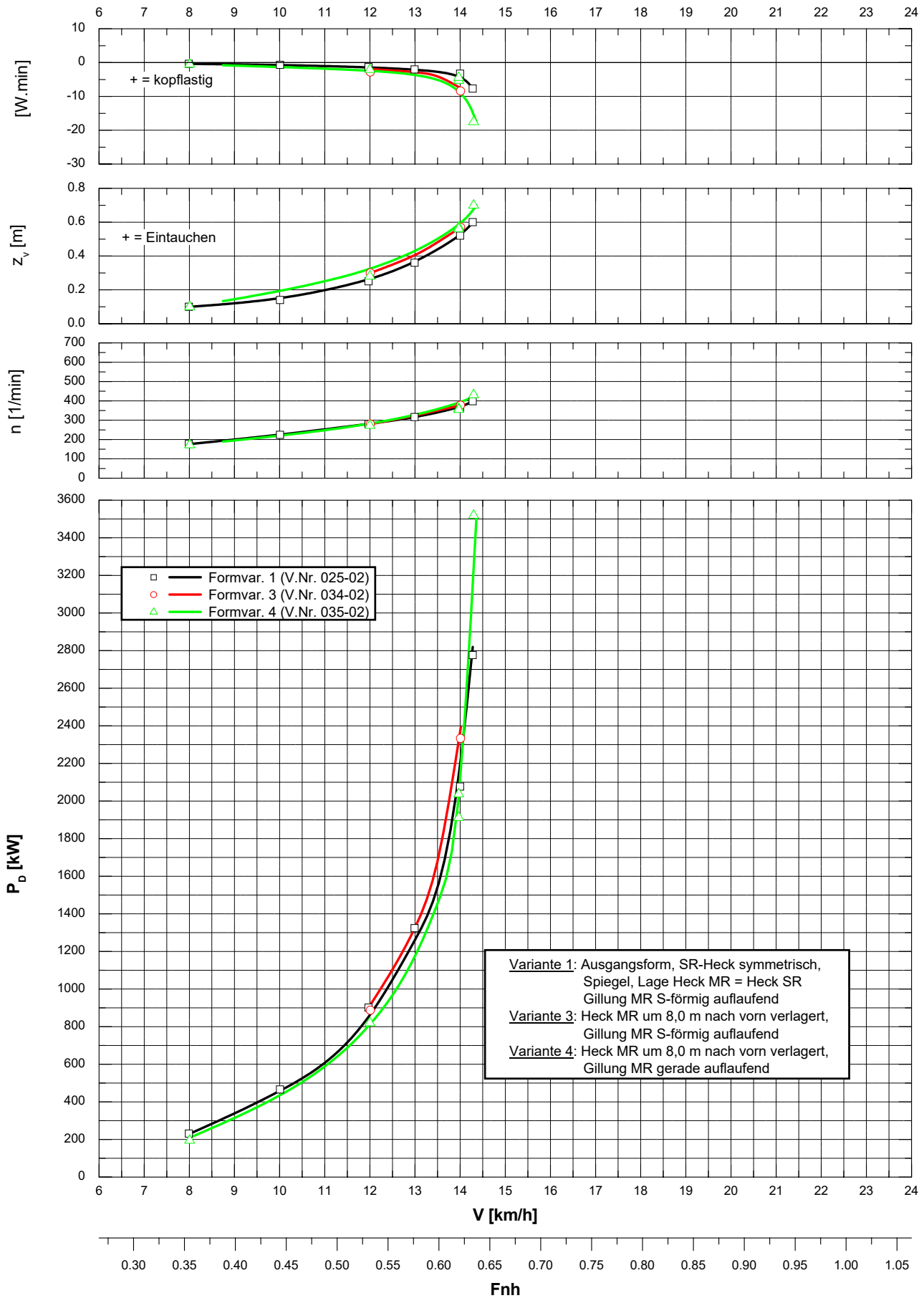
Rheinschiff, Formvariante 5,
Propulsion, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 036-02-05)



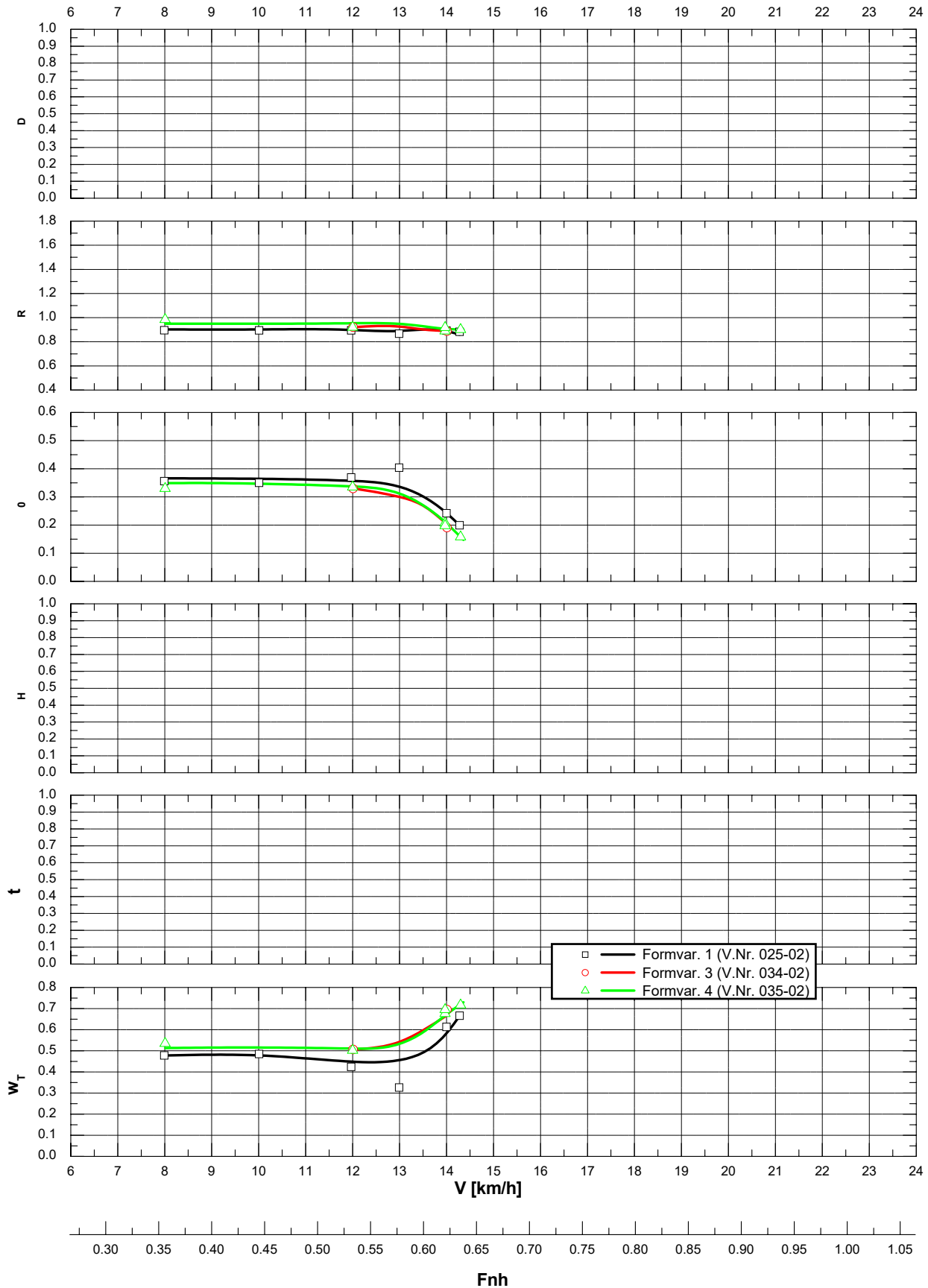
Rheinschiff, Formvariante 6,
Propulsion, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 059-02-01)

Propulsion - Formvariation -
 Semikat. (Rheinschiff), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$; $T = 2,8 \text{ m}$
 seittl. unbegr. Fahrwasser

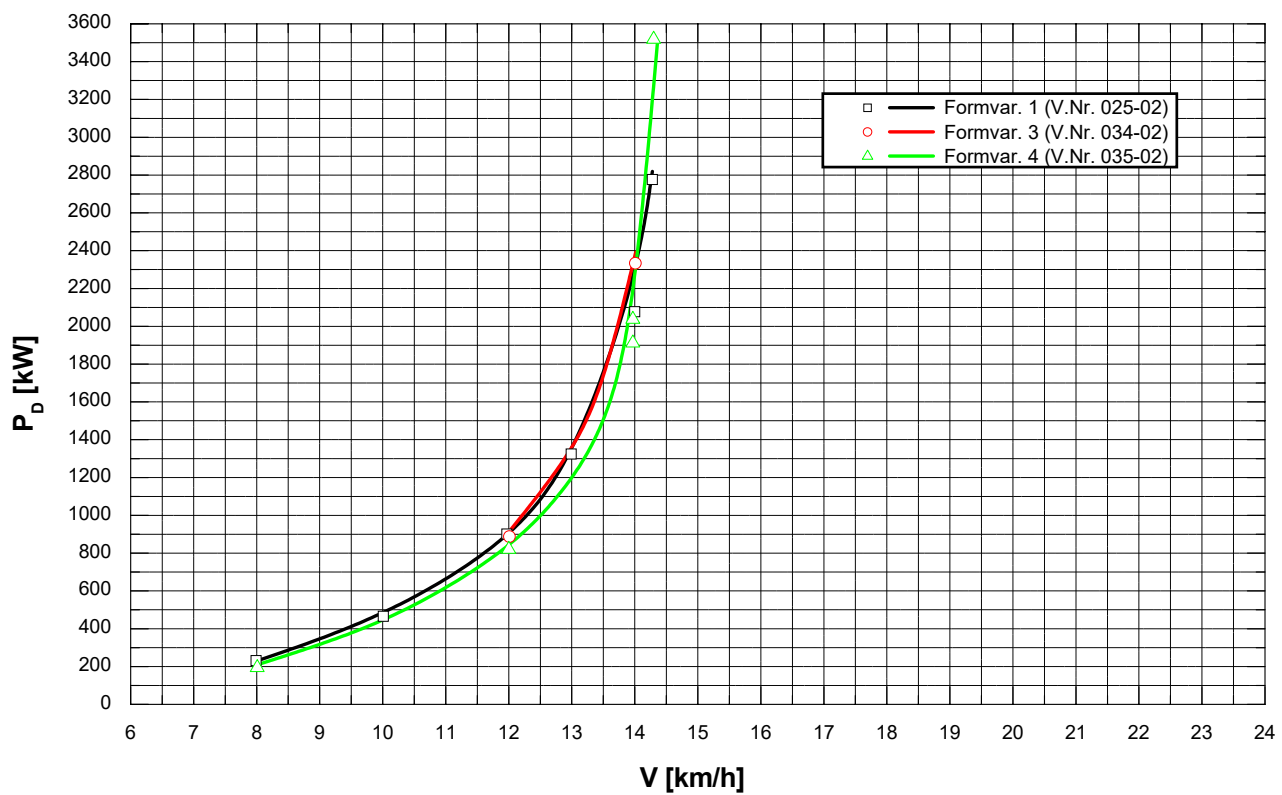
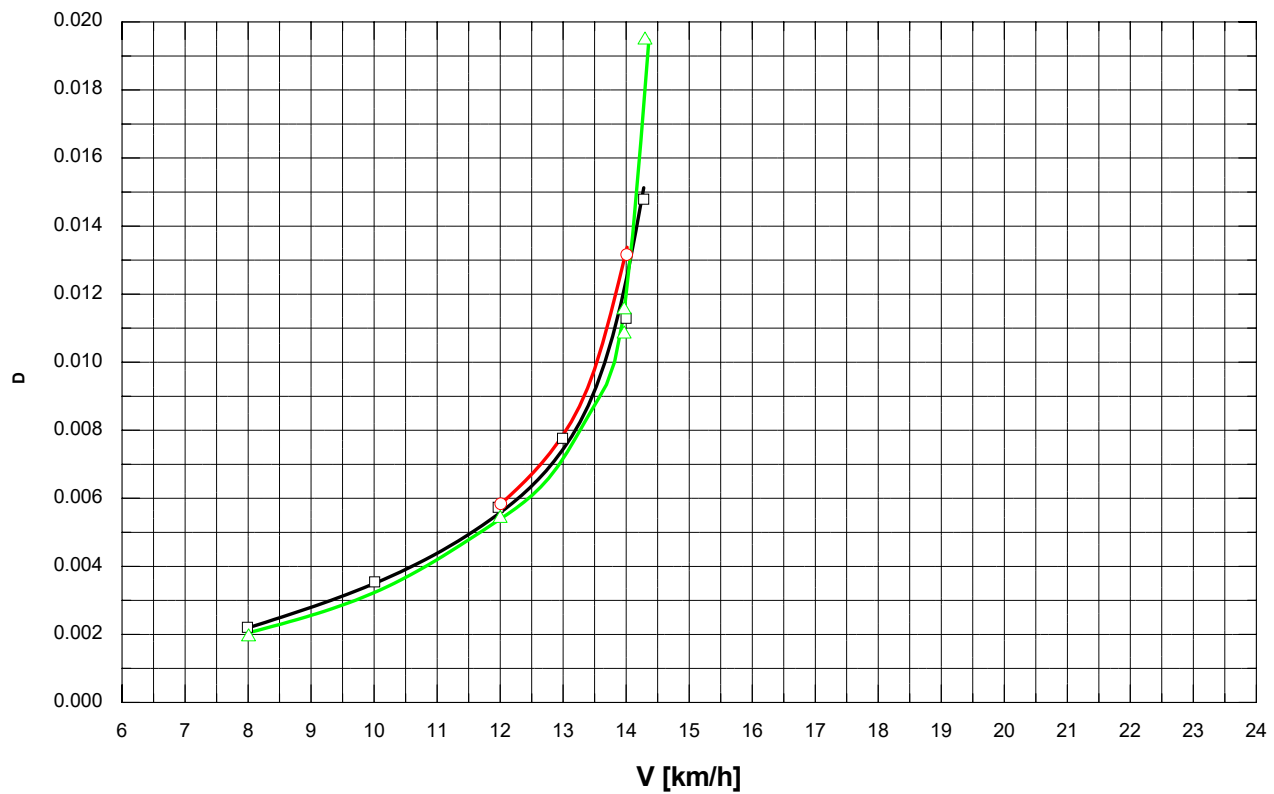
Blatt 1 von 3



Propulsion - Formvariation -
 Semikat. (Rheinschiff), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$; $T = 2,8 \text{ m}$
 seiltl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 3

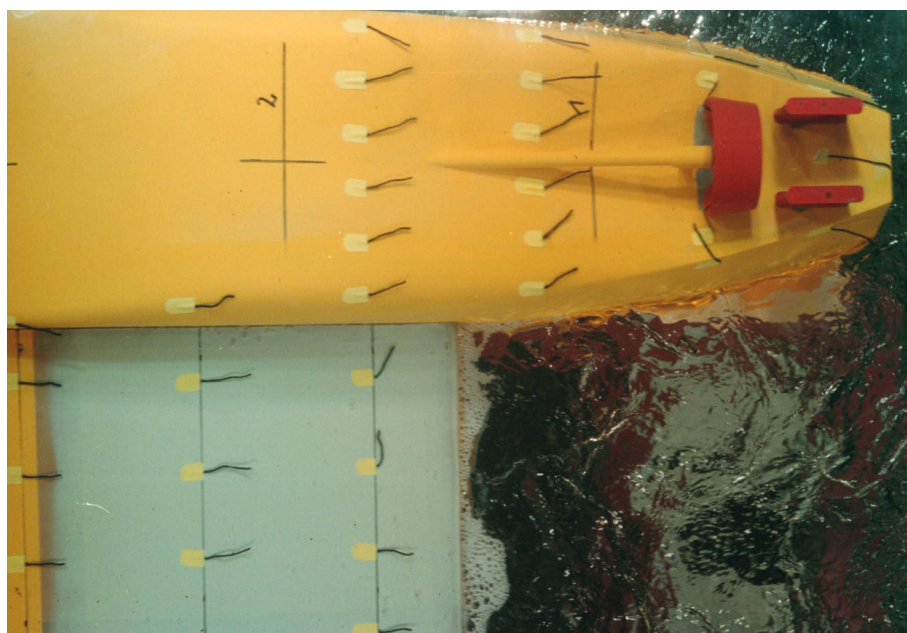


Propulsion - Formvariation -
 Spezifische Leistung
 Semikat. (Rheinschiff), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$; $T = 2,8 \text{ m}$
 seitl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 3 von 3





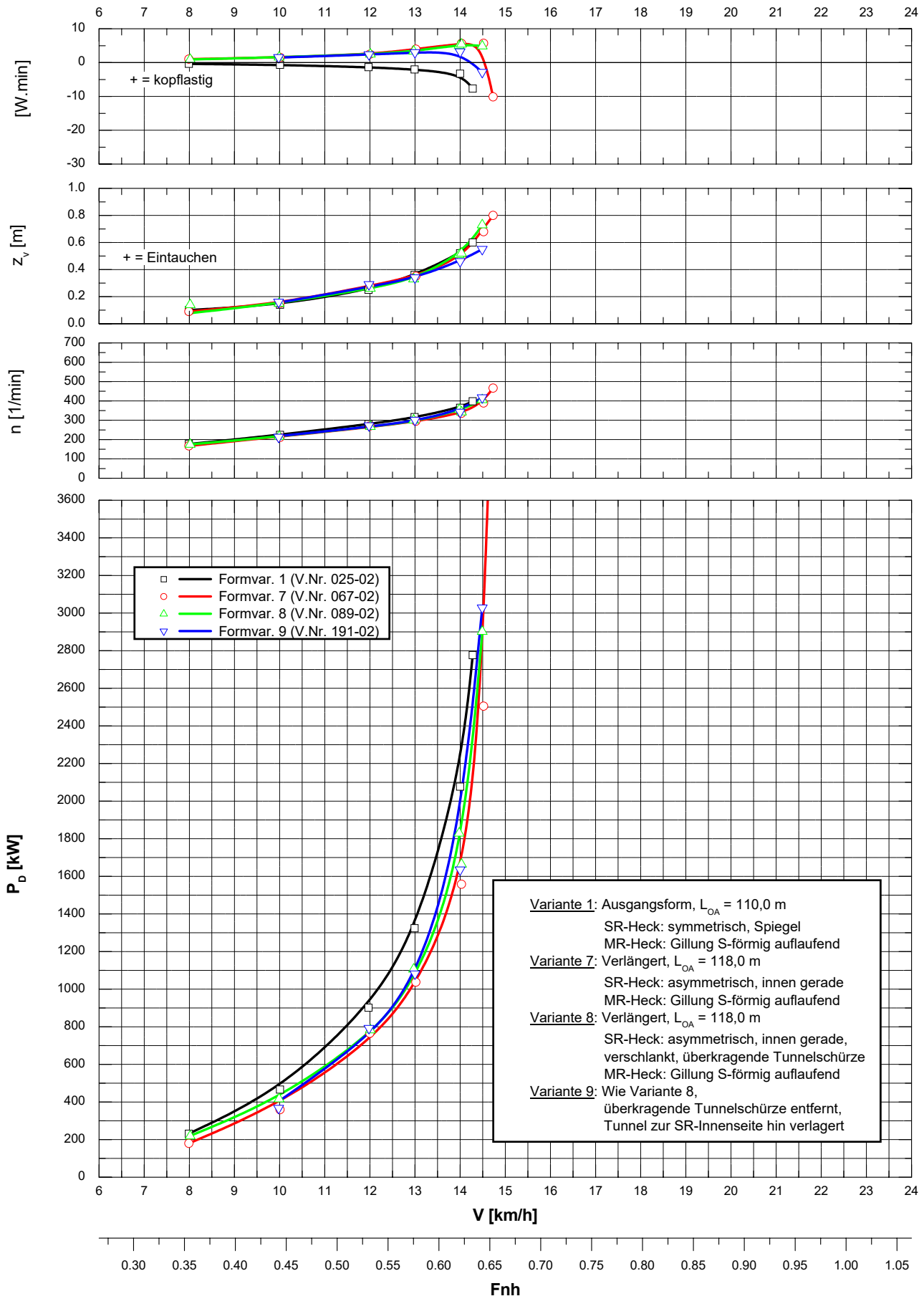
Rheinschiff, Formvariante 3,
Propulsion, $V = 14,0$ km/h,
(Vers.-Nr. 034-02-02)



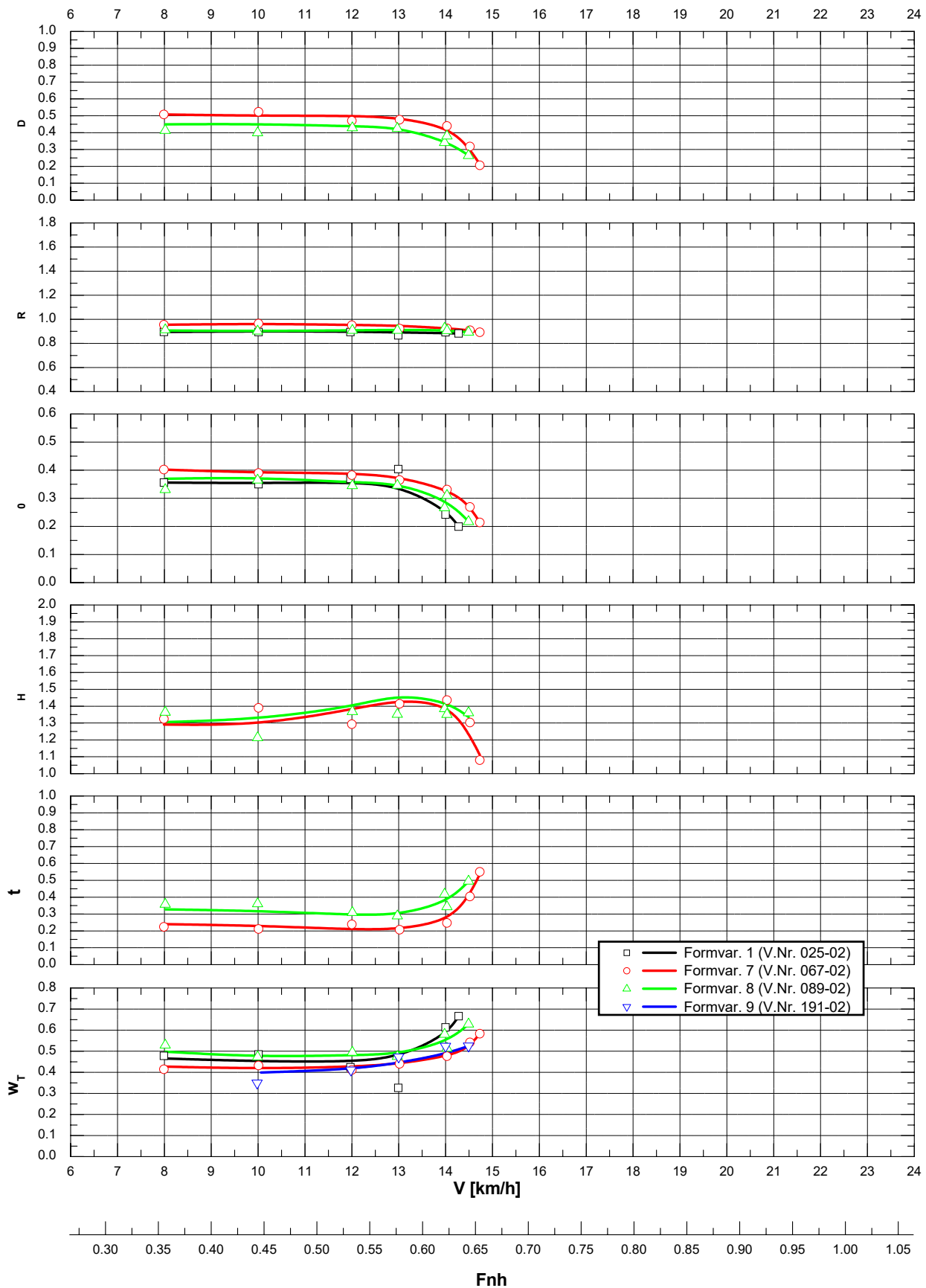
Rheinschiff, Formvariante 4,
Propulsion, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 035-02-02)

Propulsion - Formvariation -
 Semikat. (Rheinschiff), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $118,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$; $T = 2,8 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 seiltl. unbegr. Fahrwasser

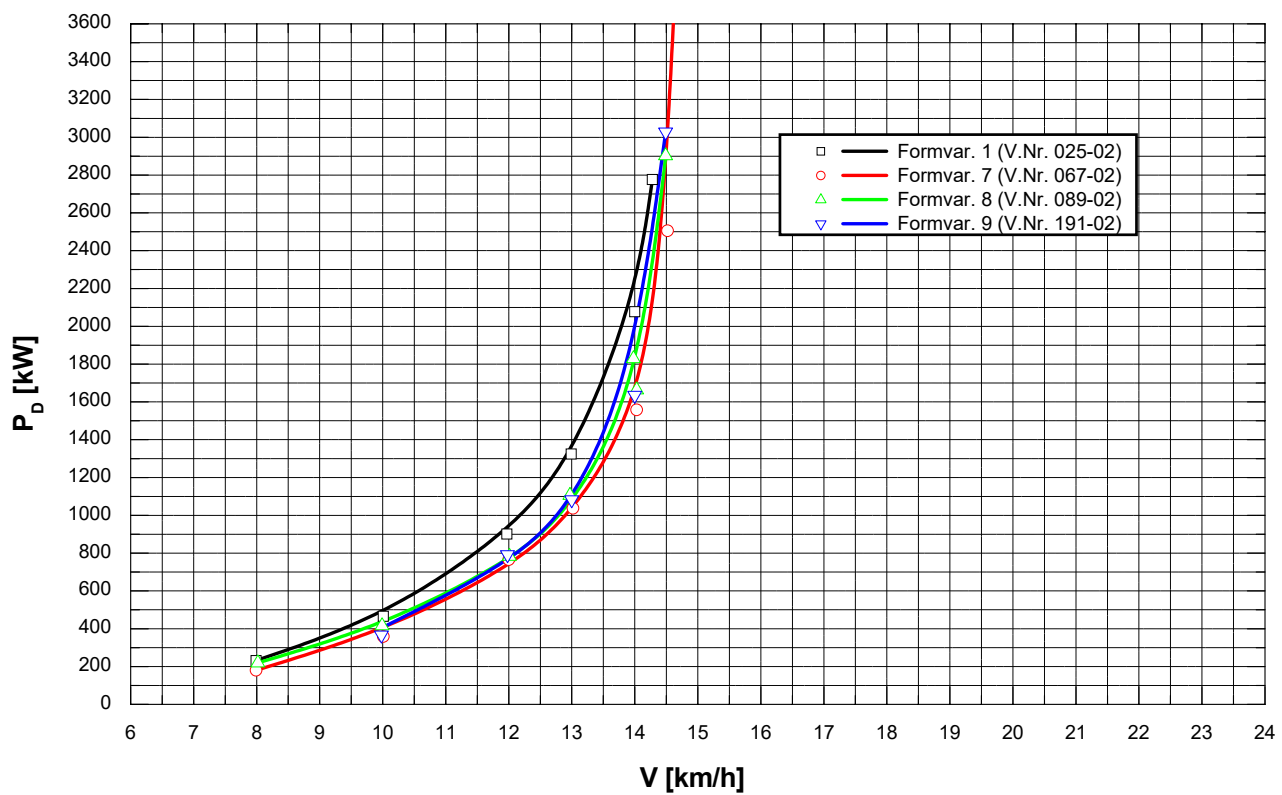
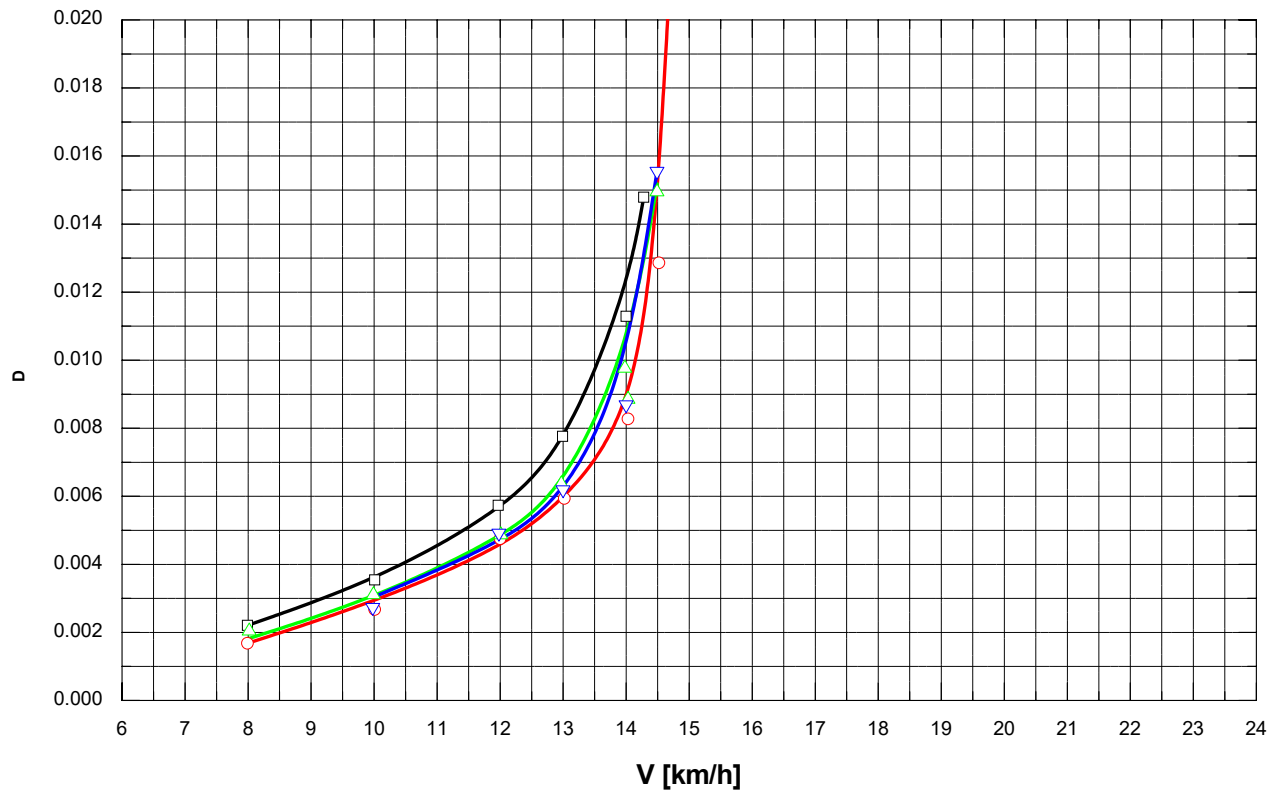
Blatt 1 von 3



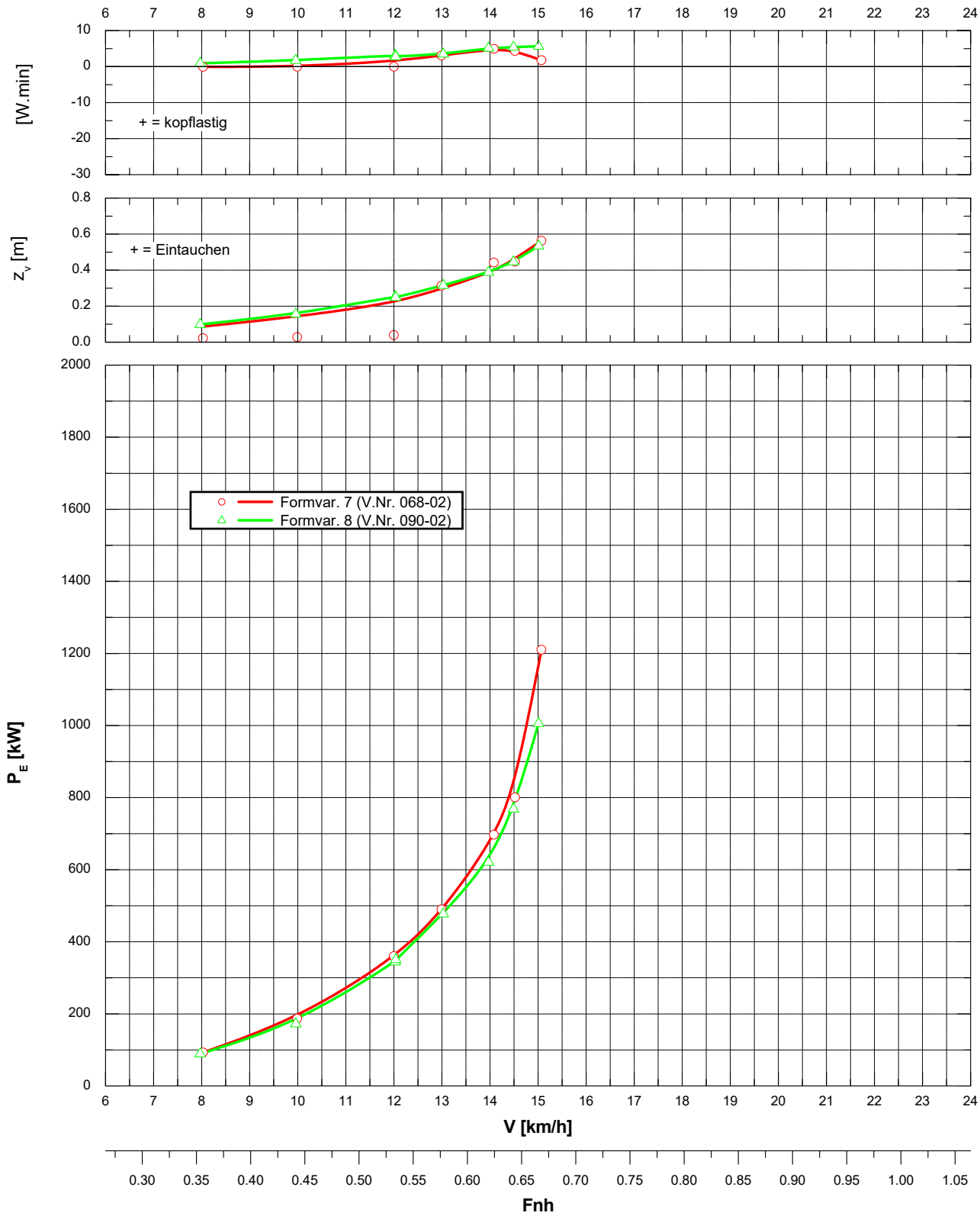
Propulsion - Formvariation -
 Semikat. (Rheinschiff), $L_{OA} = 110,0 \text{ m} ; 118,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m} ; T = 2,8 \text{ m} ; h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 seiti. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 3



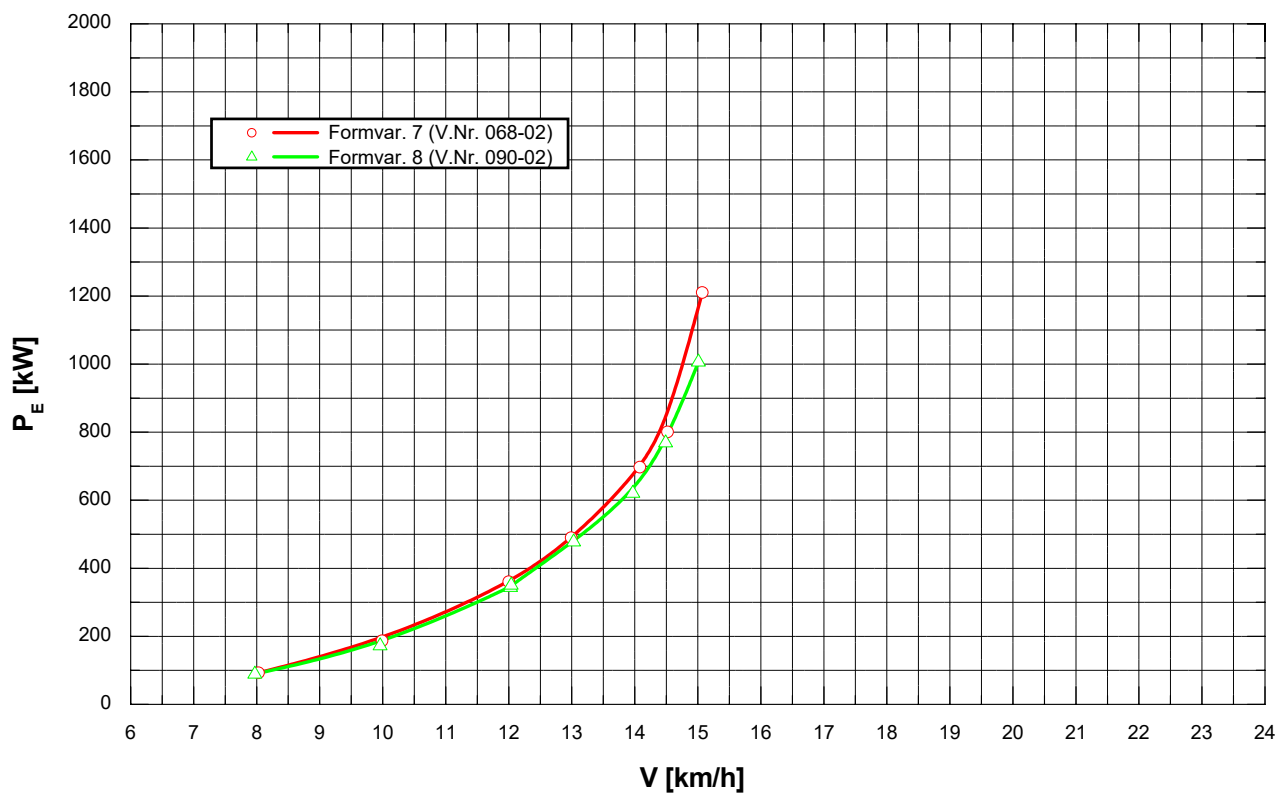
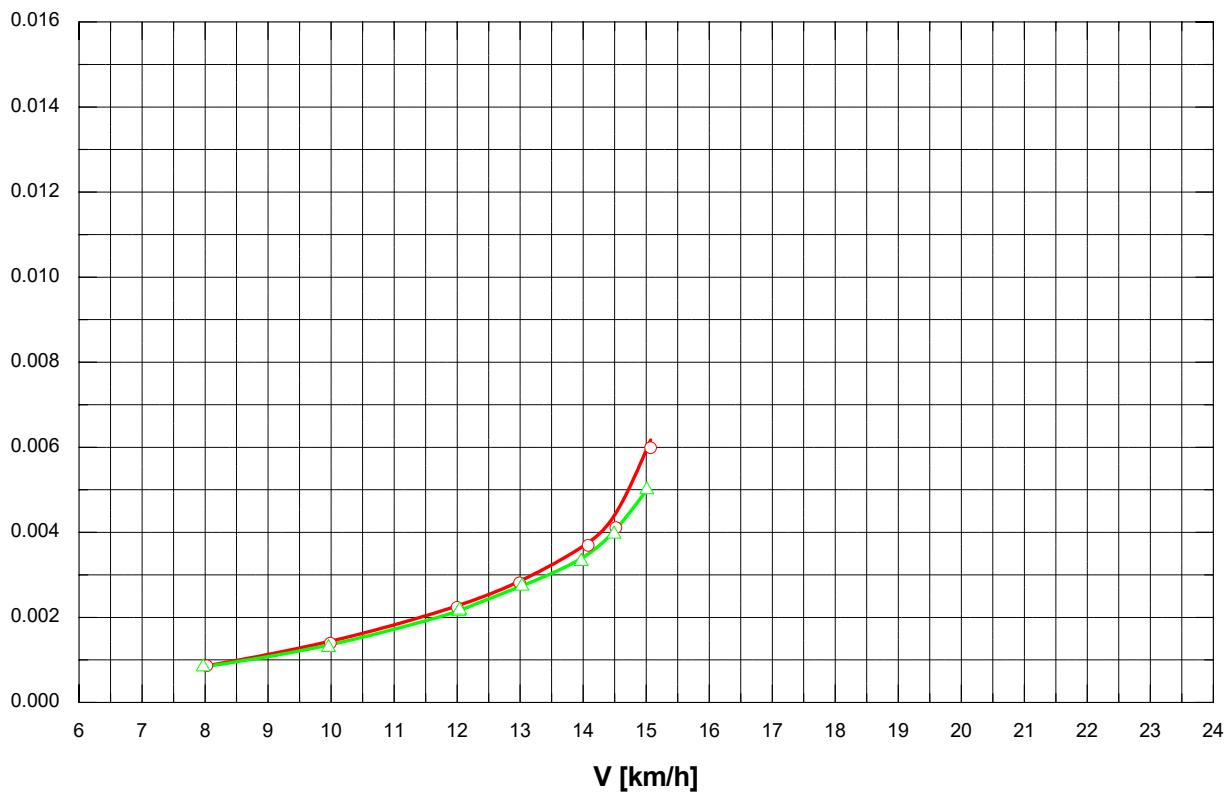
Propulsion - Formvariation -
 Spezifische Leistung
 Semikat. (Rheinschiff), $L_{OA} = 110,0 \text{ m} ; 118,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m} ; T = 2,8 \text{ m} ; h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 seütl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 3 von 3



Widerstand - Formvariation -
Semikat. (Rheinschiff), $L_{OA} = 110,0\text{ m}$; $118,0\text{ m}$
 $h = 4,0\text{ m}$; $T = 2,8\text{ m}$; $h_{MR} = 1,0\text{ m}$
seitl. unbegr. Fahrwasser
Blatt 1 von 2



Widerstand - Formvariation -
Spezifischer Widerstand
 Semikat. (Rheinschiff), $L_{OA} = 110,0 \text{ m}$; $118,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$; $T = 2,8 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 seiltl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 2





Rheinschiff, Formvariante 7,
Propulsion, $V = 14,0$ km/h,
(Vers.-Nr. 067-02-01)



Rheinschiff, Formvariante 7,
Widerstand, $V = 14,0$ km/h,
(Vers.-Nr. 068-02-03)



Rheinschiff, Formvariante 8,
Propulsion, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 089-02-05)



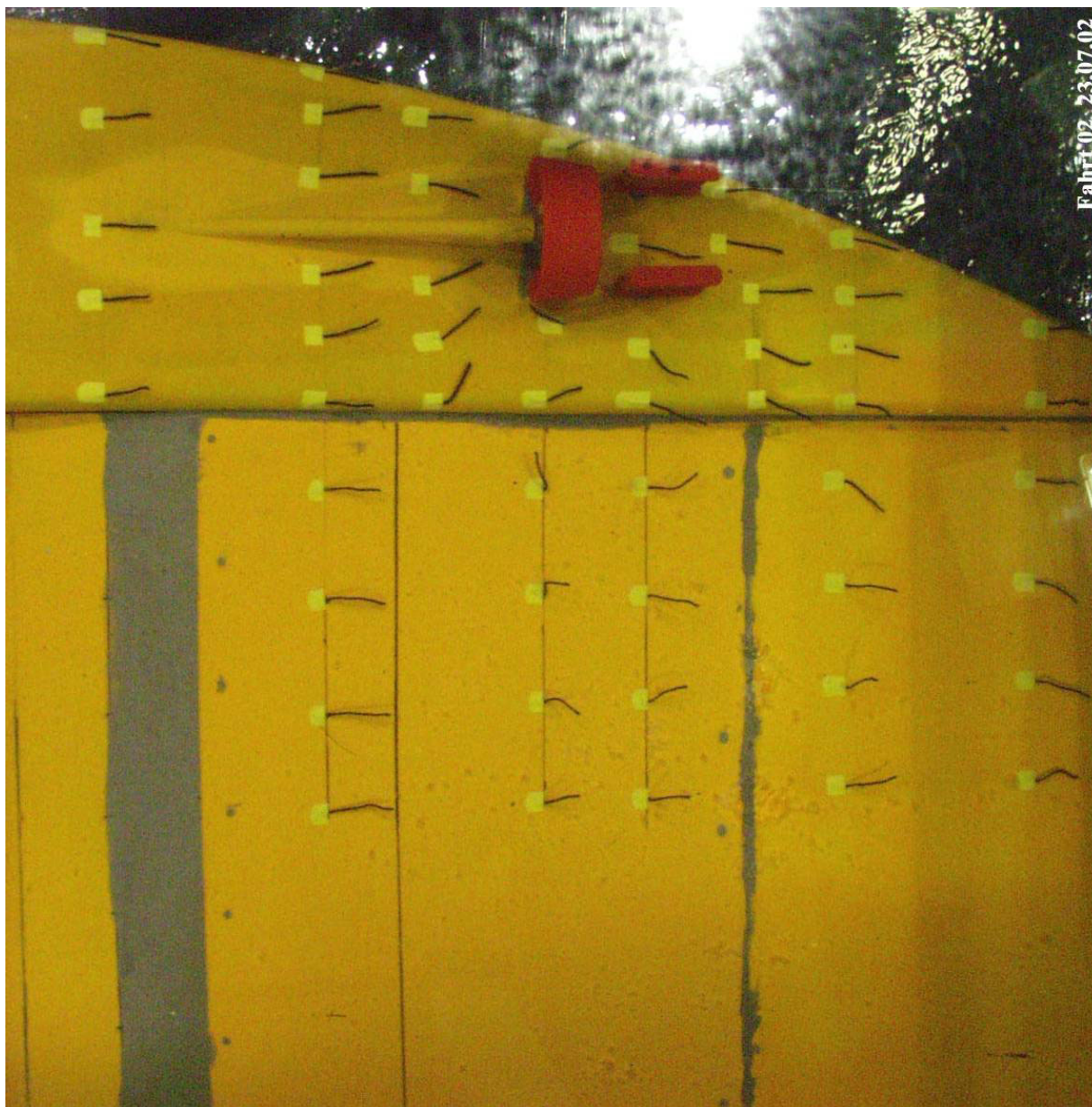
Rheinschiff, Formvariante 8,
Propulsion, $V = 14,0$ km/h,
(Vers.-Nr. 089-02-05)



Rheinschiff, Formvariante 8,
Widerstand, $V = 14,0$ km/h,
(Vers.-Nr. 090-02-01)



Rheinschiff, Formvariante 8,
Propulsion, $V = 14,0$ km/h,
(Vers.-Nr. 089-02-08)

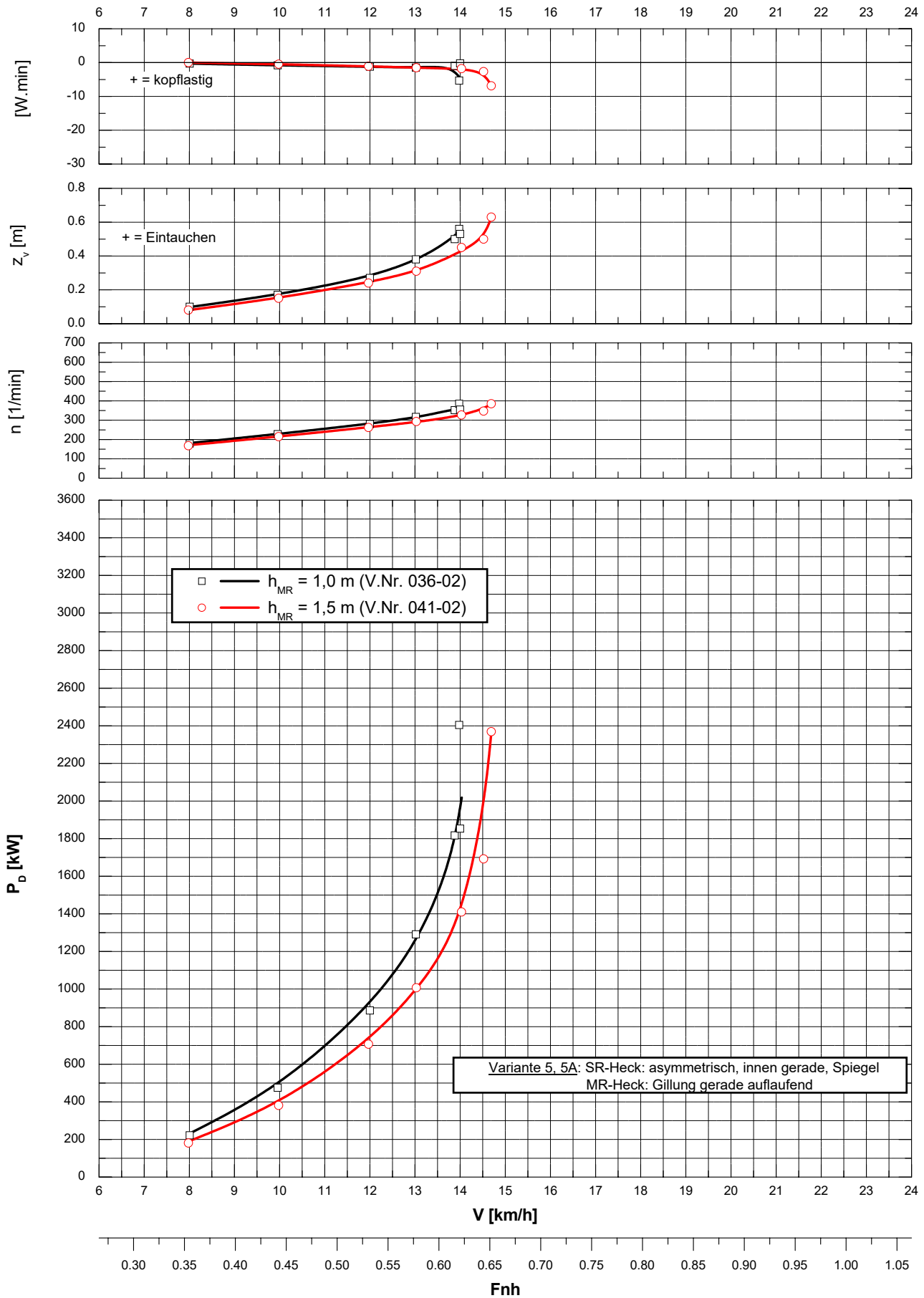


Rheinschiff, Formvariante 9,
Propulsion, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 191-02-02)

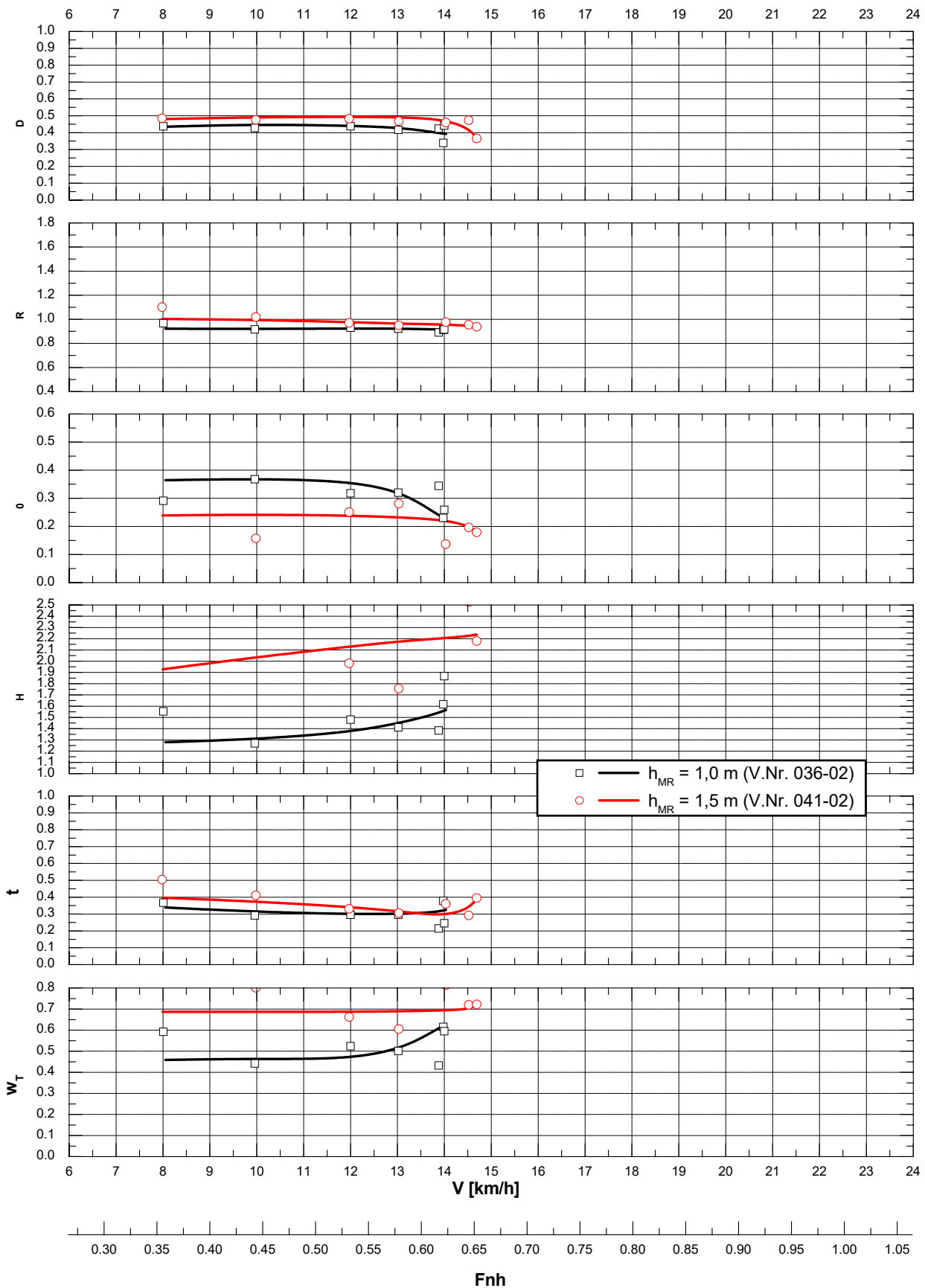
Propulsion - Variation der MR-Höhe -
Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 5, 5A), $L_{OA} = 110,0$ m

$h = 4,0$ m ; $T = 2,8$ m
seitl. unbegr. Fahrwasser

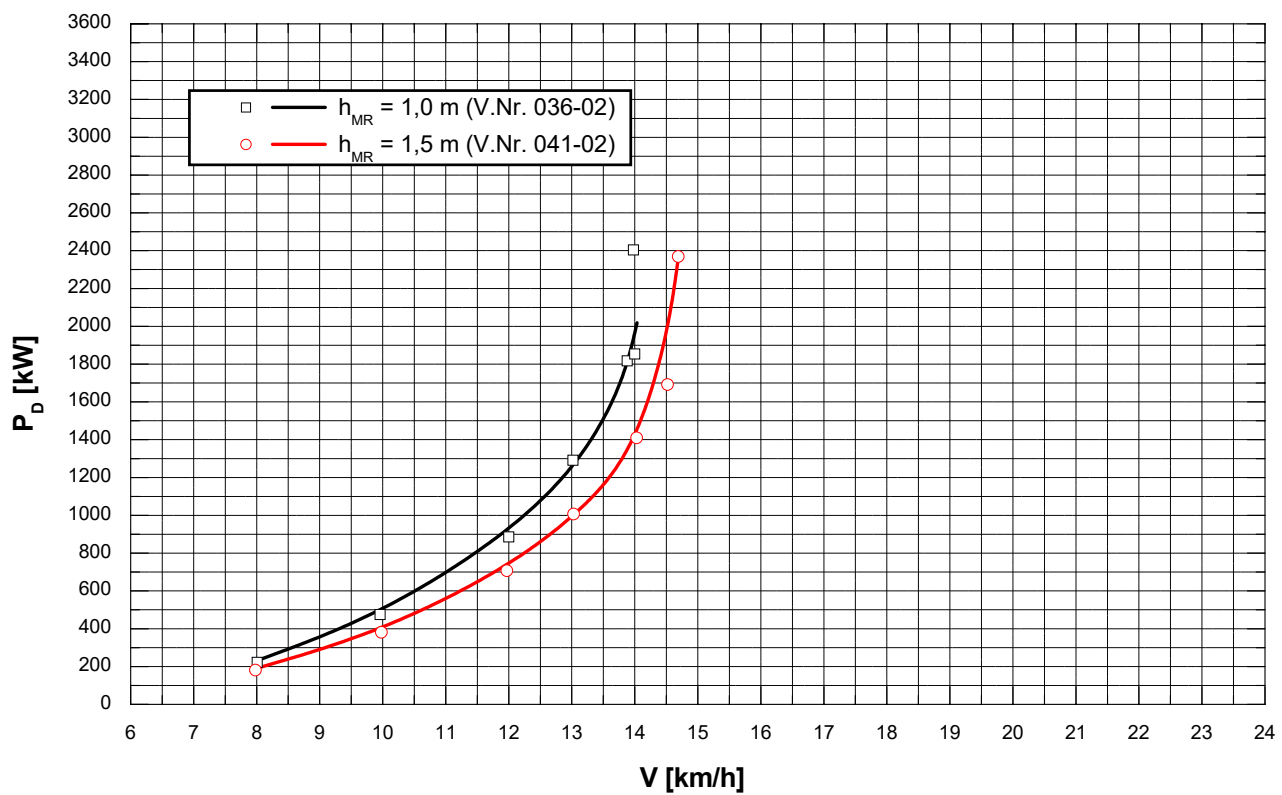
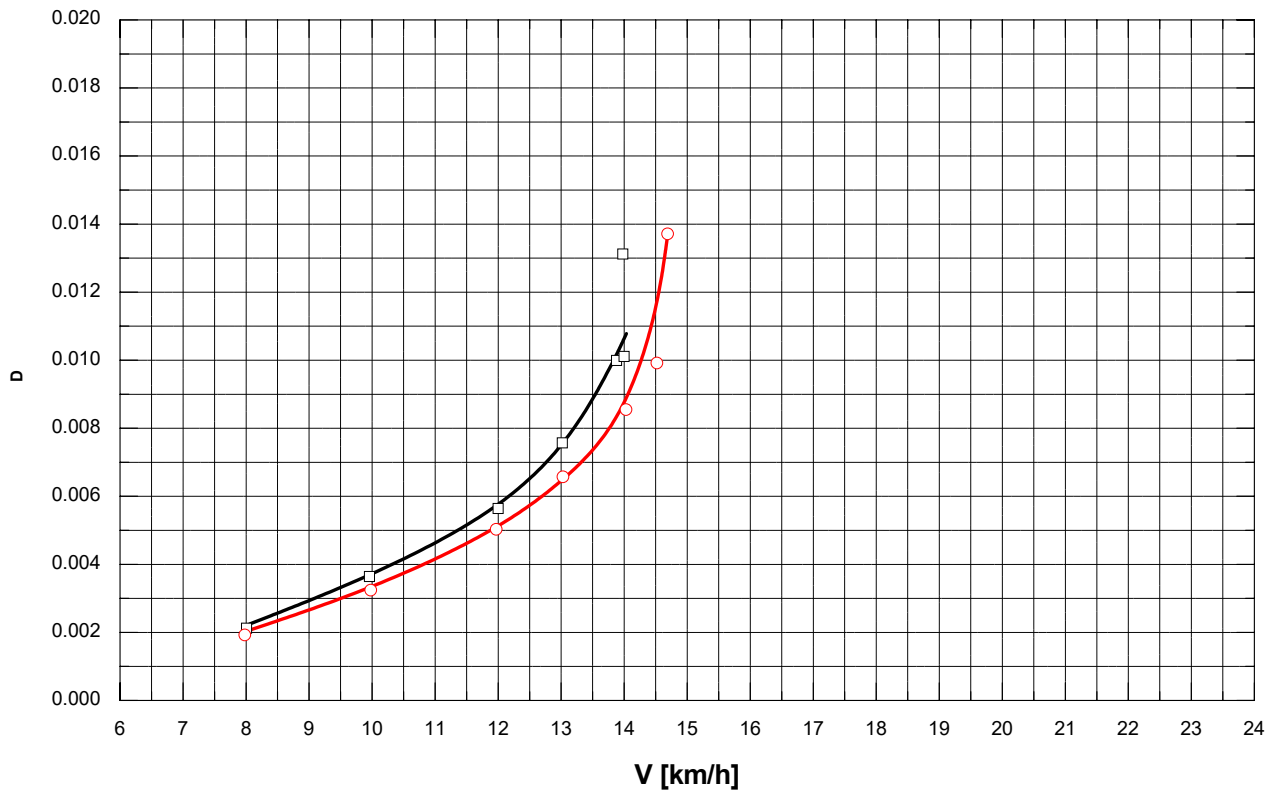
Blatt 1 von 3



Propulsion - Variation der MR-Höhe -
 Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 5, 5A), $L_{OA} = 110,0$ m
 $h = 4,0$ m ; $T = 2,8$ m
 seitl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 3



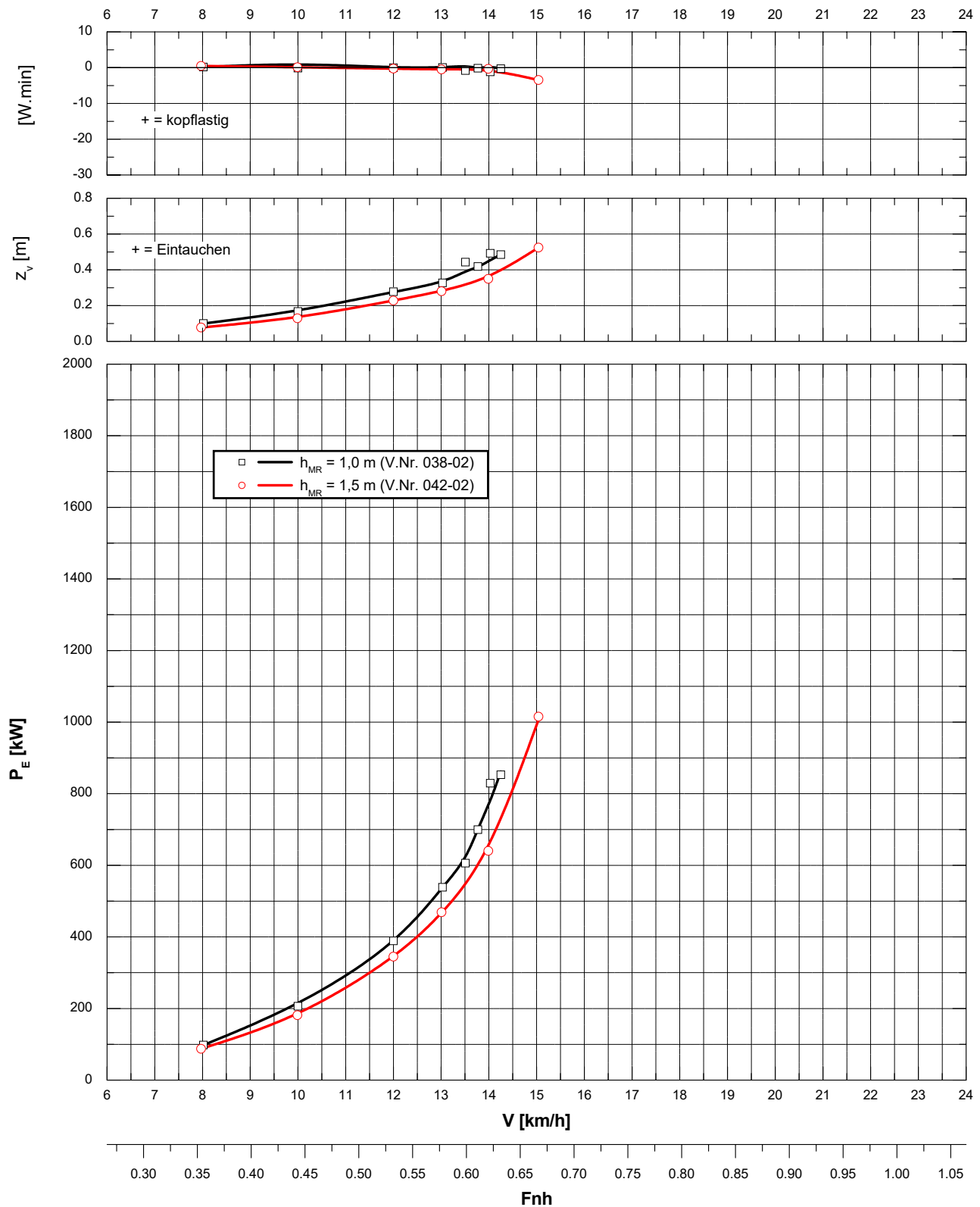
Propulsion - Variation der MR-Höhe -
 Spezifische Leistung
 Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 5, 5A), $L_{OA} = 110,0$ m
 $h = 4,0$ m ; $T = 2,8$ m
 seitl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 3 von 3



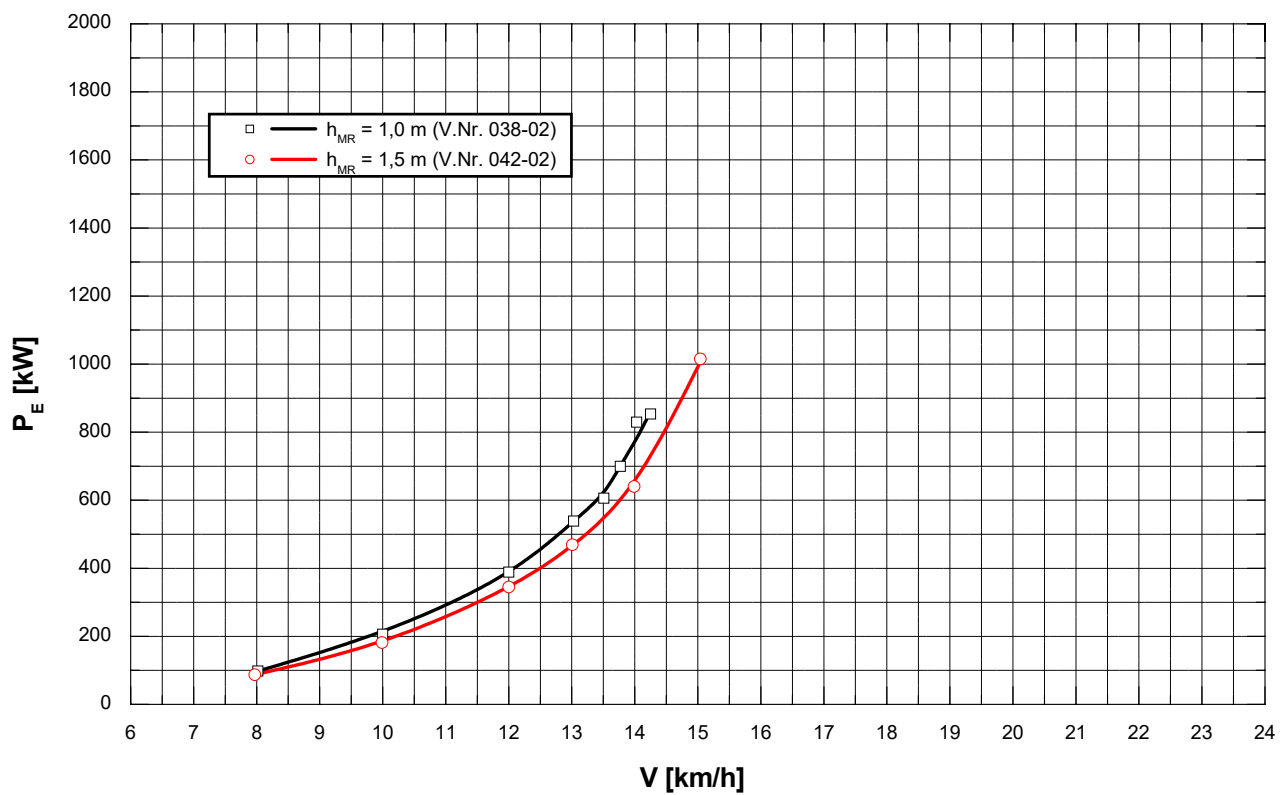
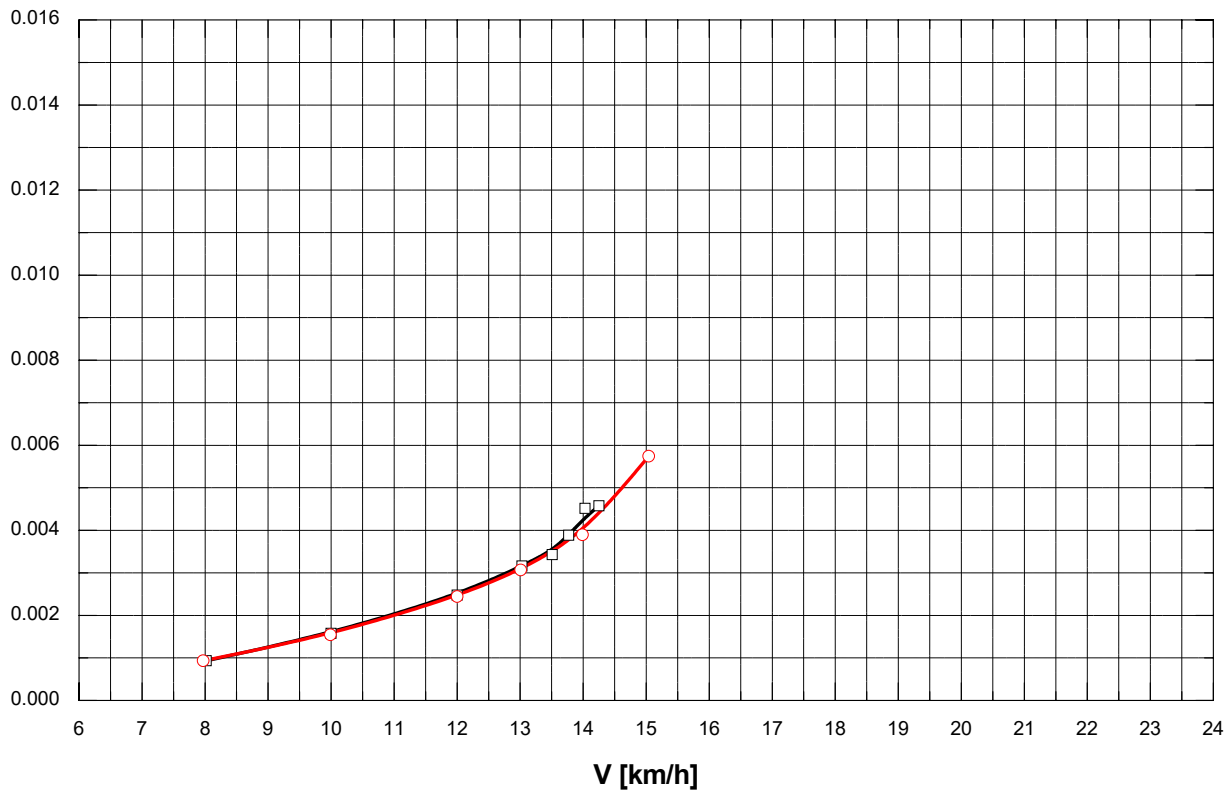
Widerstand - Variation der MR-Höhe -
 Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 5, 5A), $L_{OA} = 110,0$ m

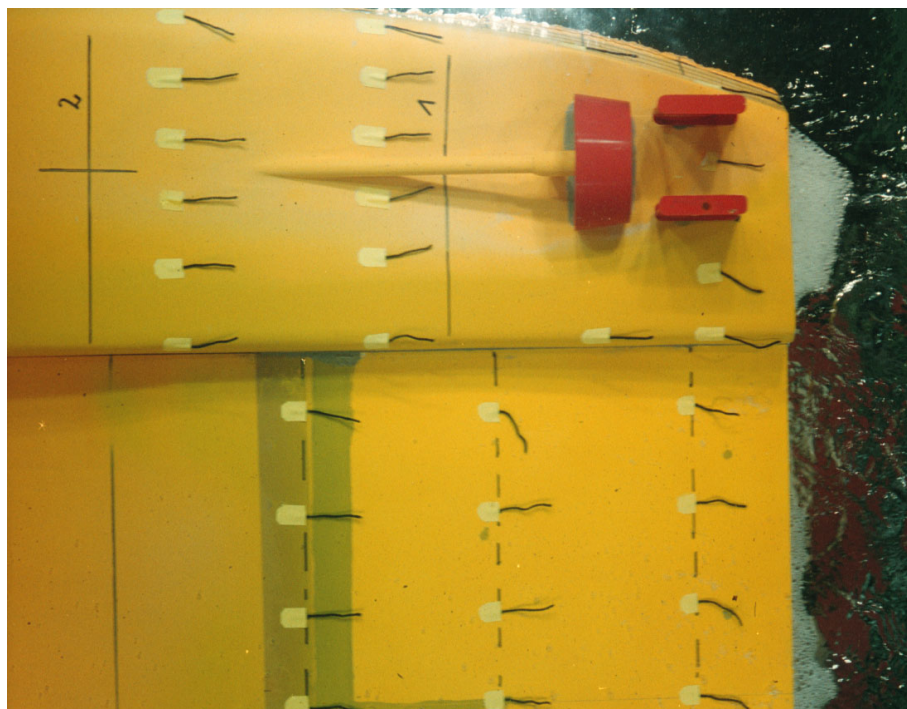
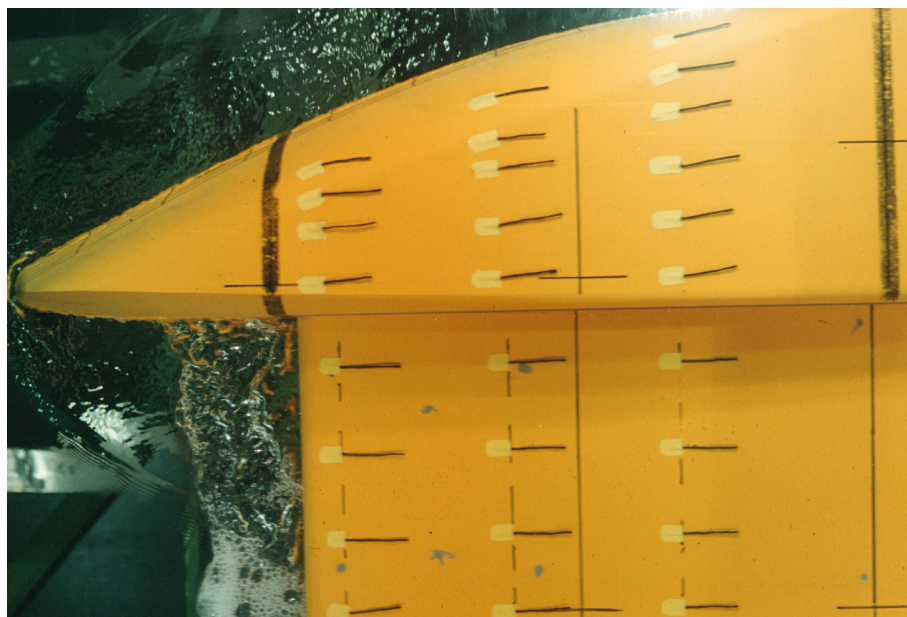
$h = 4,0$ m ; $T = 2,8$ m
 seitr. unbegr. Fahrwasser

Blatt 1 von 2

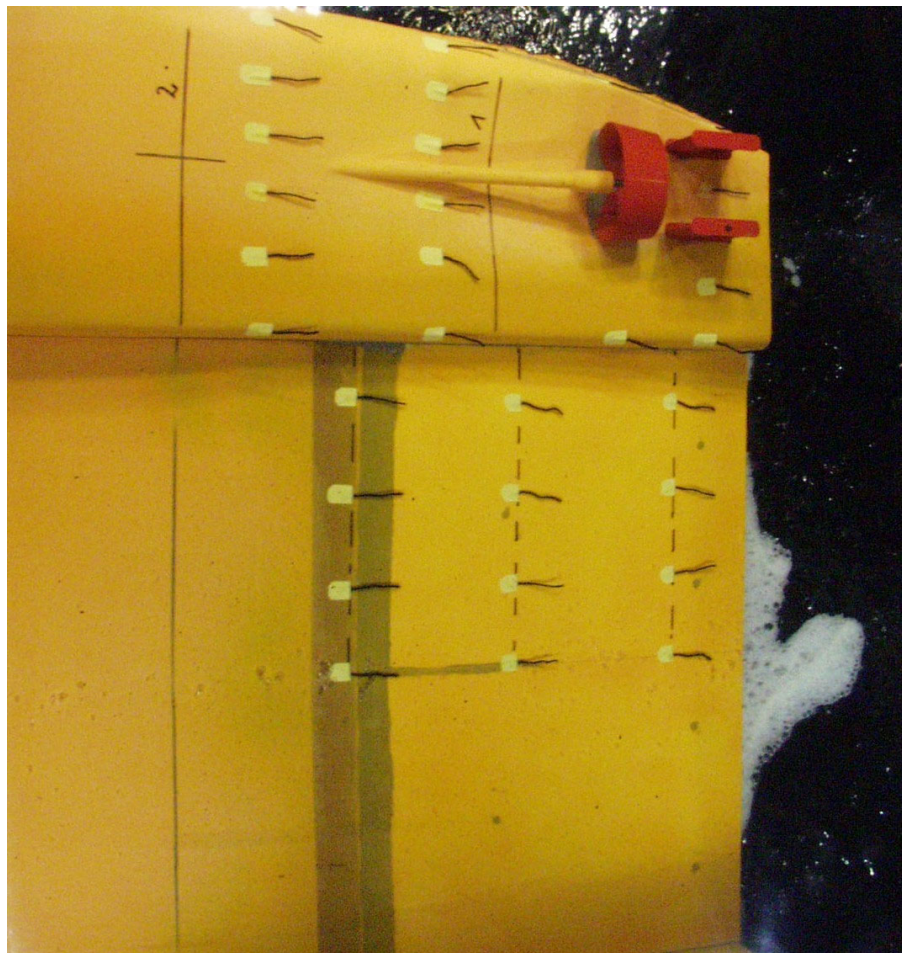


**Widerstand - Variation der MR-Höhe -
Spezifischer Widerstand**
Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 5, 5A), $L_{OA} = 110,0$ m
 $h = 4,0$ m ; $T = 2,8$ m
seitl. unbegr. Fahrwasser
Blatt 2 von 2





Rheinschiff, Formvariante 5A,
Propulsion, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 041-02-04)

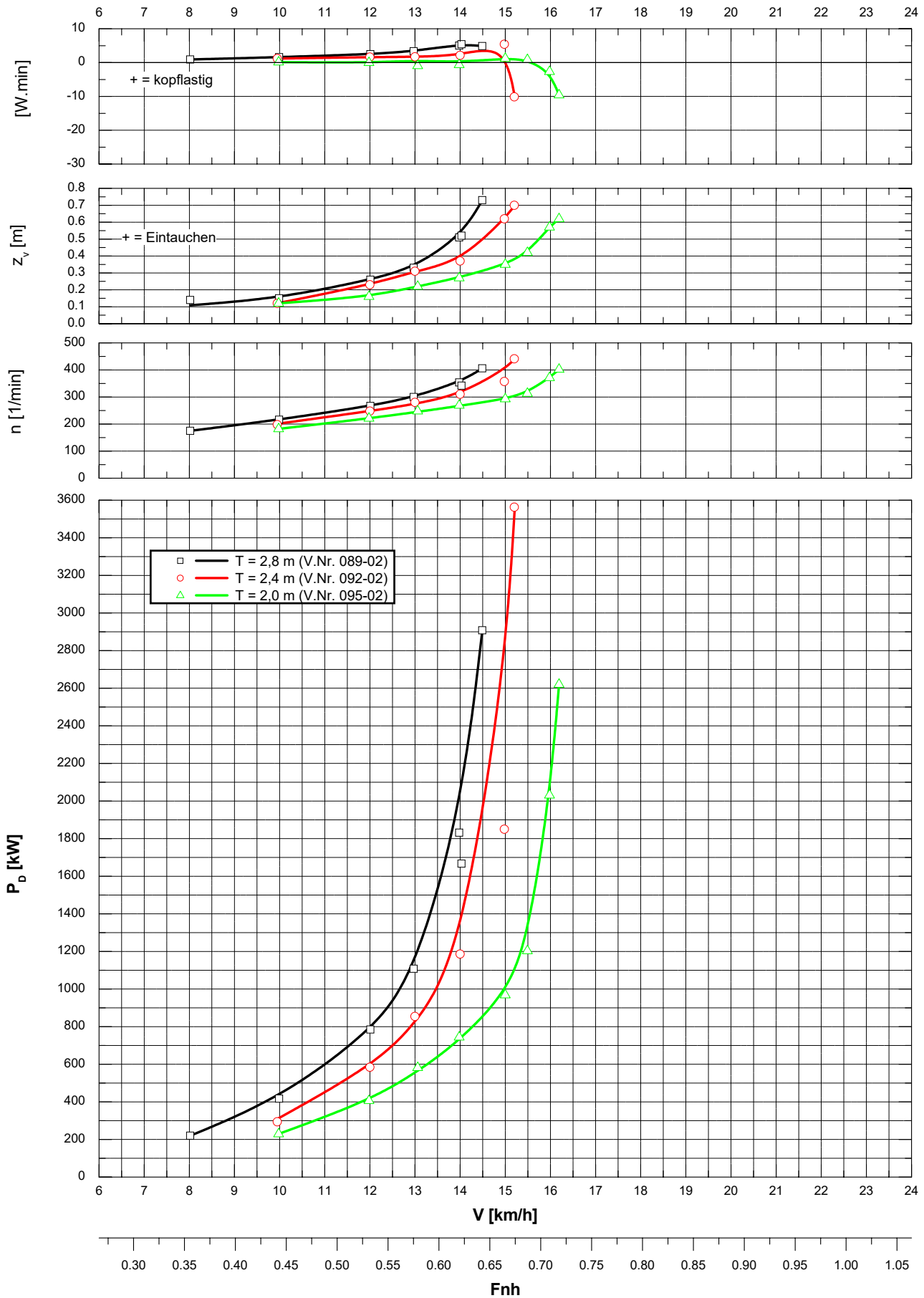


Rheinschiff, Formvariante 5A,
Widerstand, $V = 14,0 \text{ km/h}$,
(Vers.-Nr. 042-02-03)

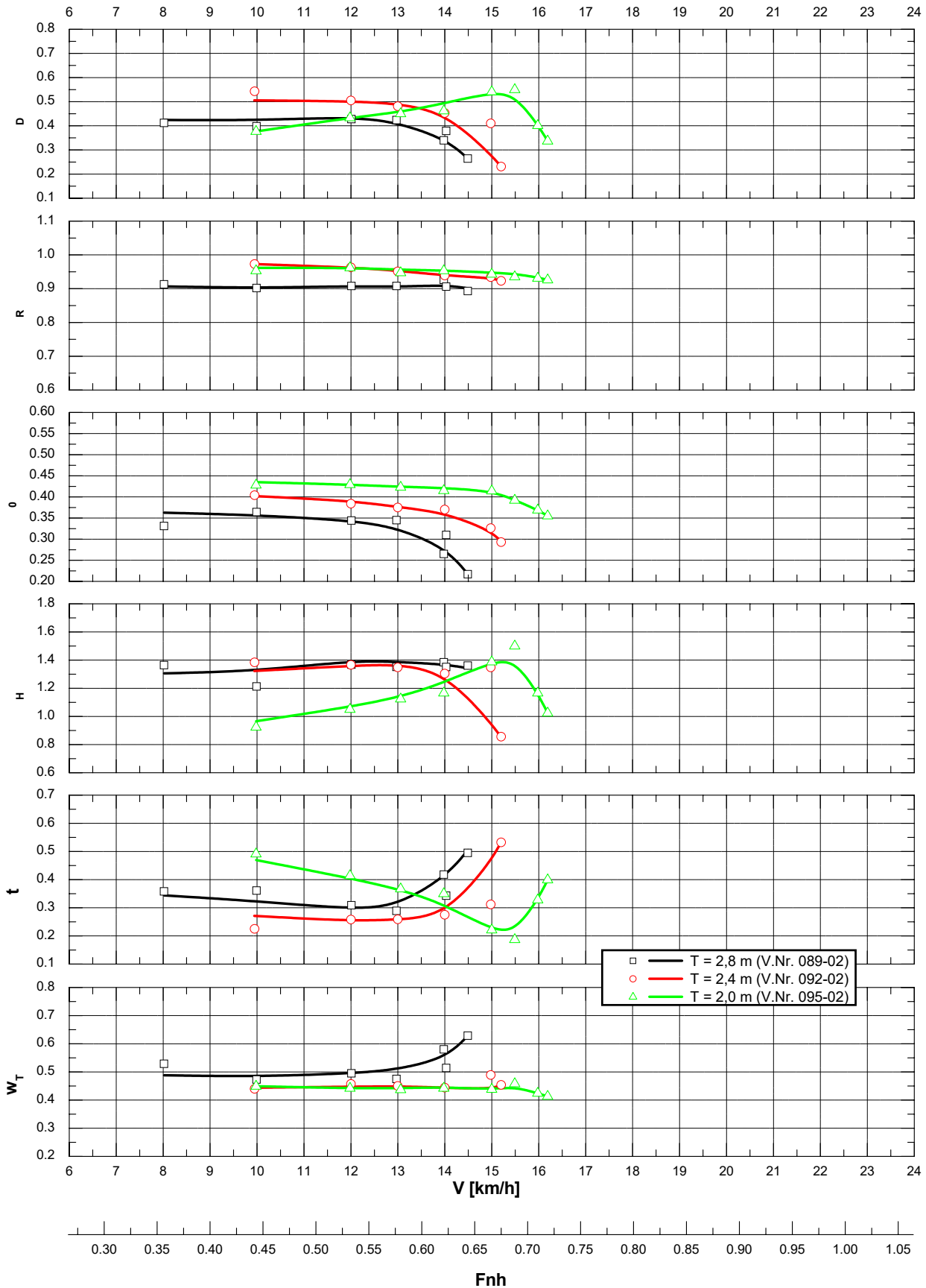
Propulsion - Systematische Versuche
 Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 8), $L_{OA} = 118,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 4,0 \text{ m}$
 seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 1 von 3



Propulsion - Systematische Versuche
 Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 8), $L_{OA} = 118,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$
 seittl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 3



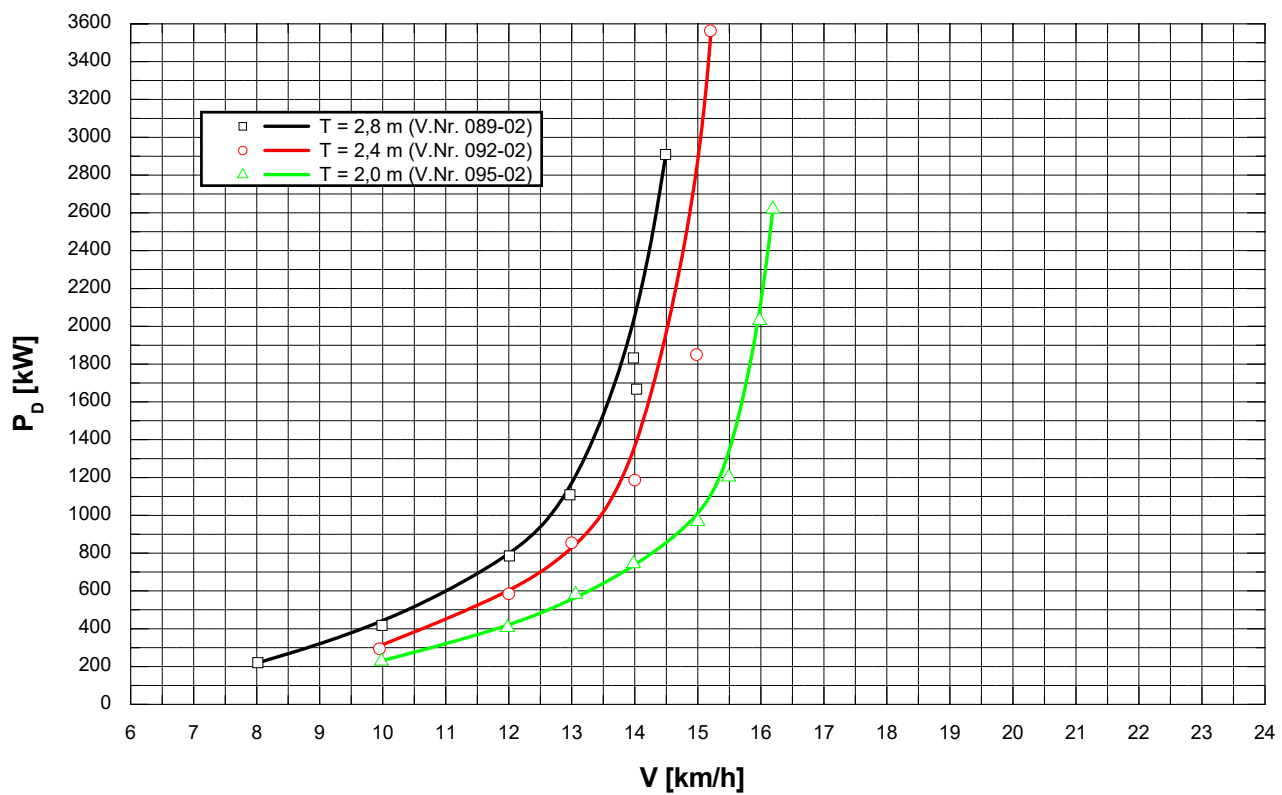
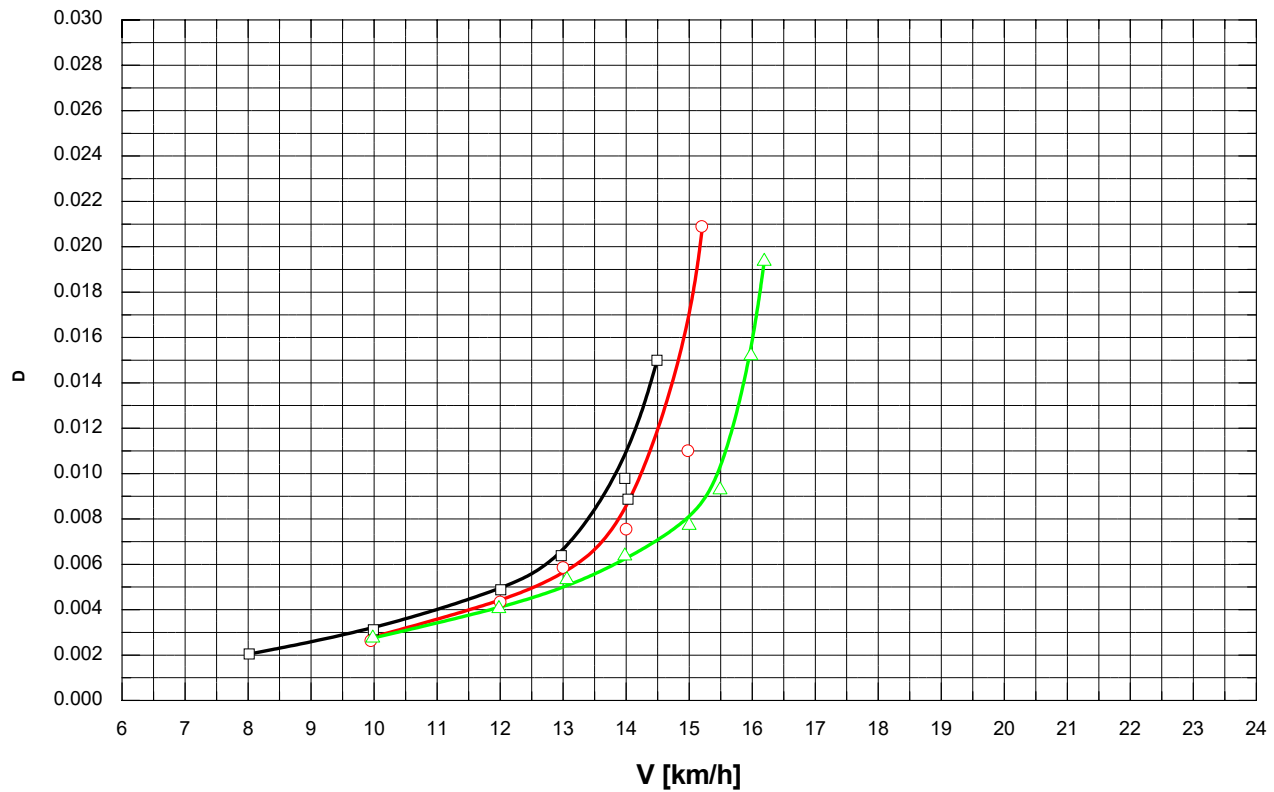
Propulsion - Systematische Versuche Spezifische Leistung

Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 8), $L_{OA} = 118,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 4,0 \text{ m}$

seitl. unbegr. Fahrwasser

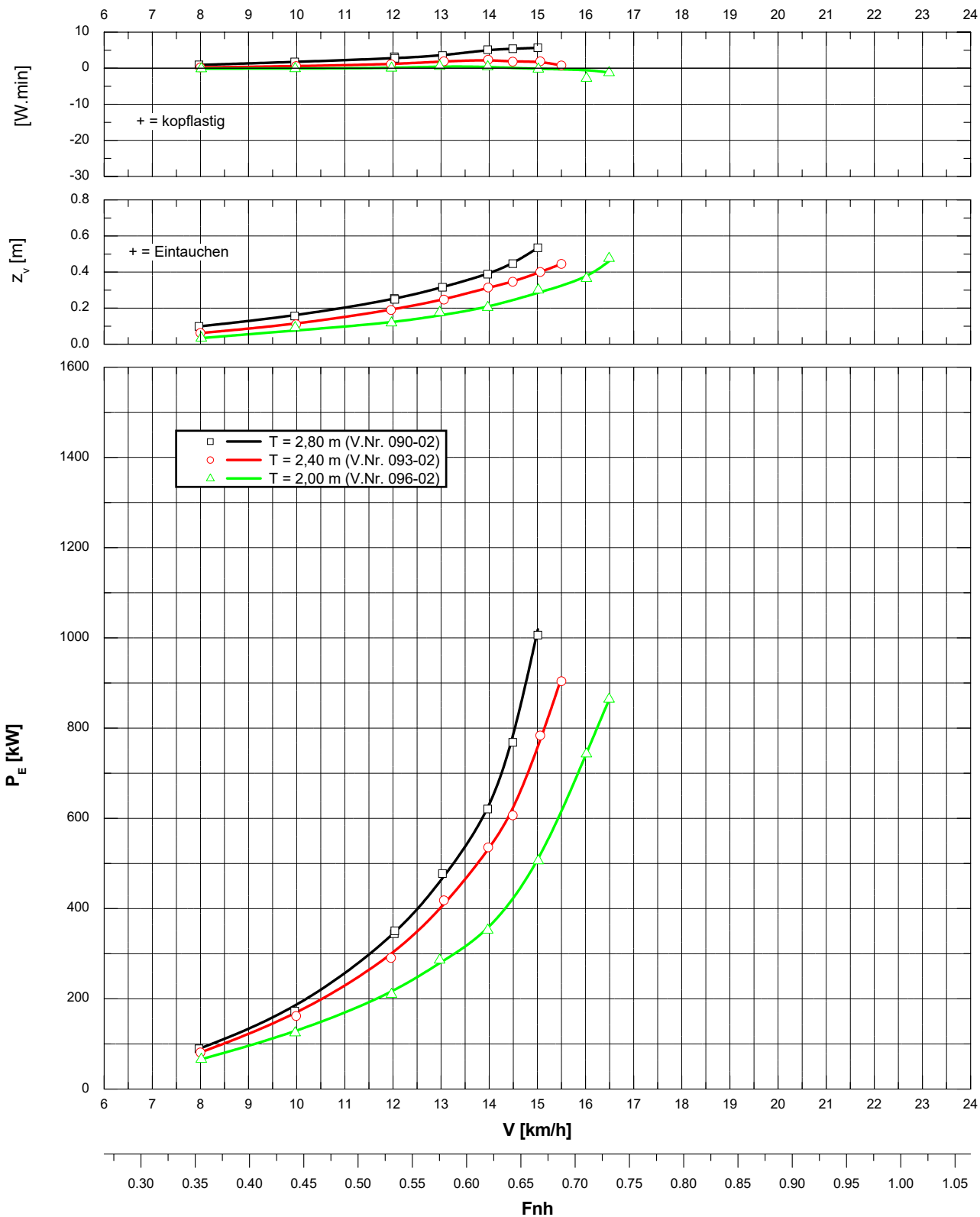
Blatt 3 von 3



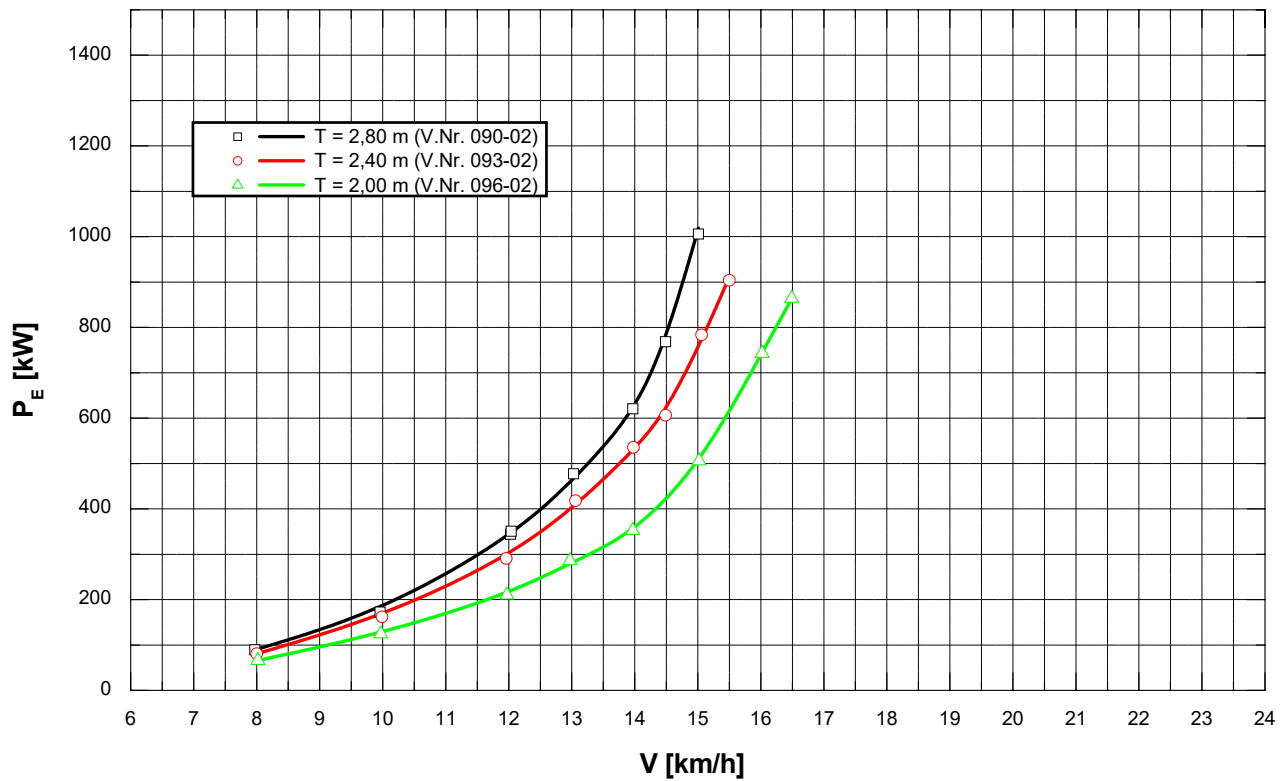
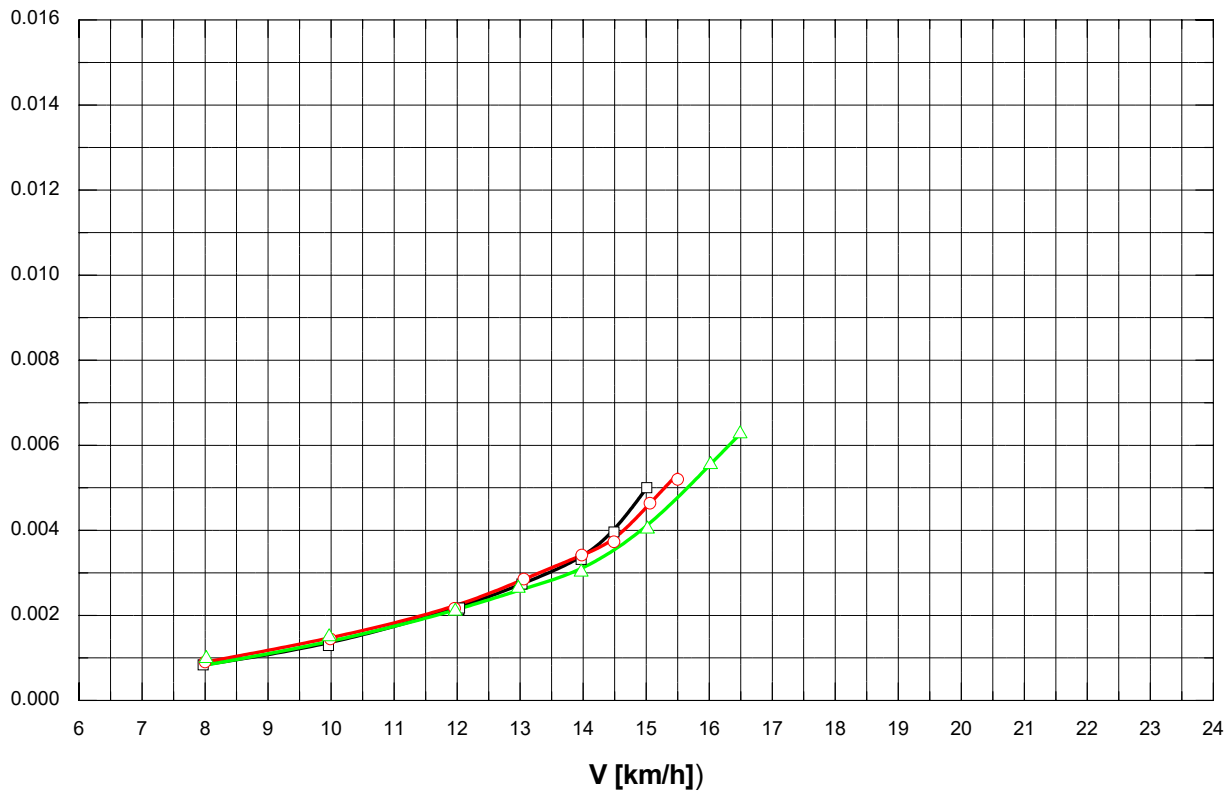
Widerstand - Systematische Versuche -
 Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 8), $L_{OA} = 118,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 4,0 \text{ m}$
 seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 1 von 2



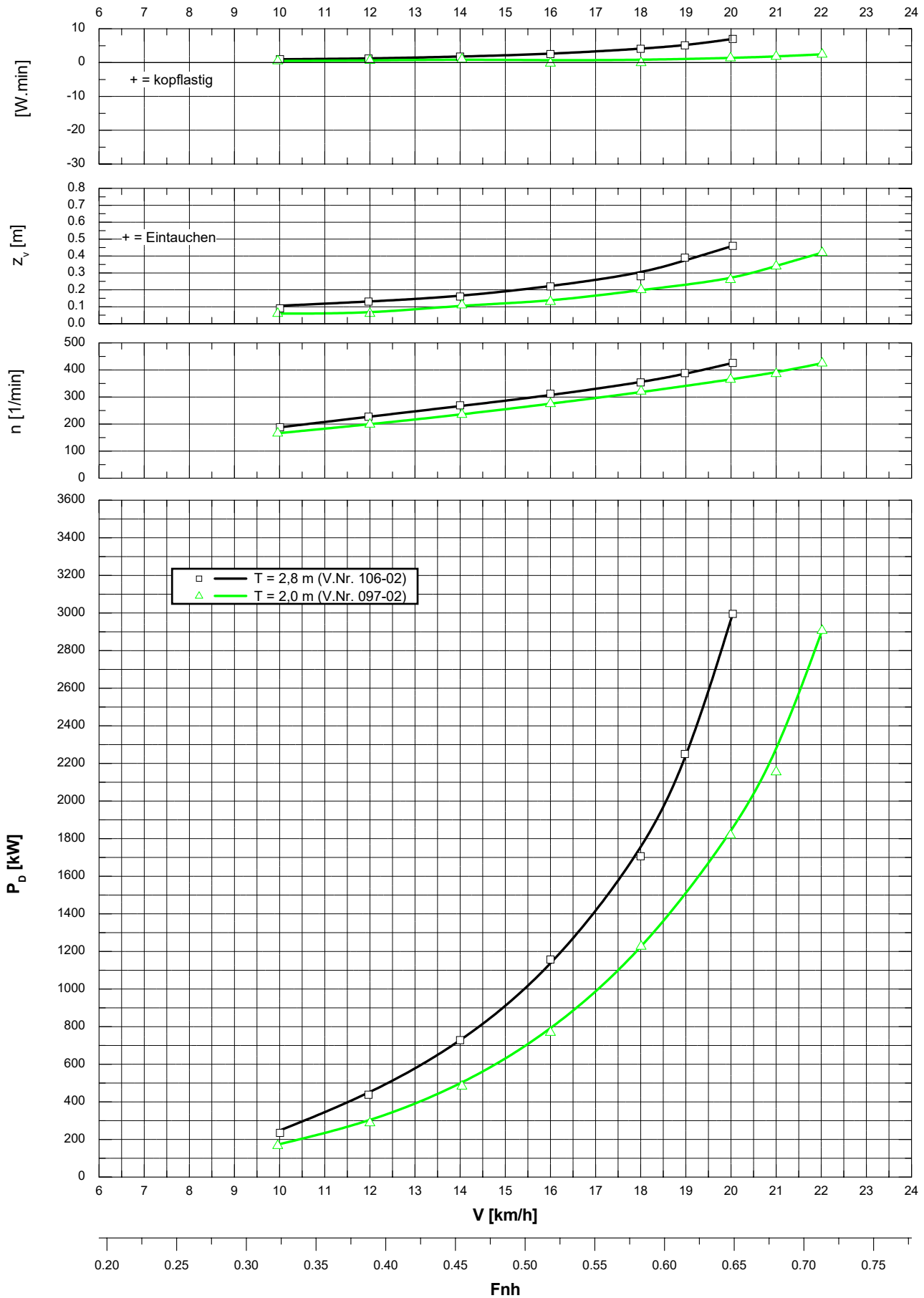
Widerstand - Systematische Versuche -
Spezifischer Widerstand
 Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 8), $L_{OA} = 118,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 4,0 \text{ m}$
 seith. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 2



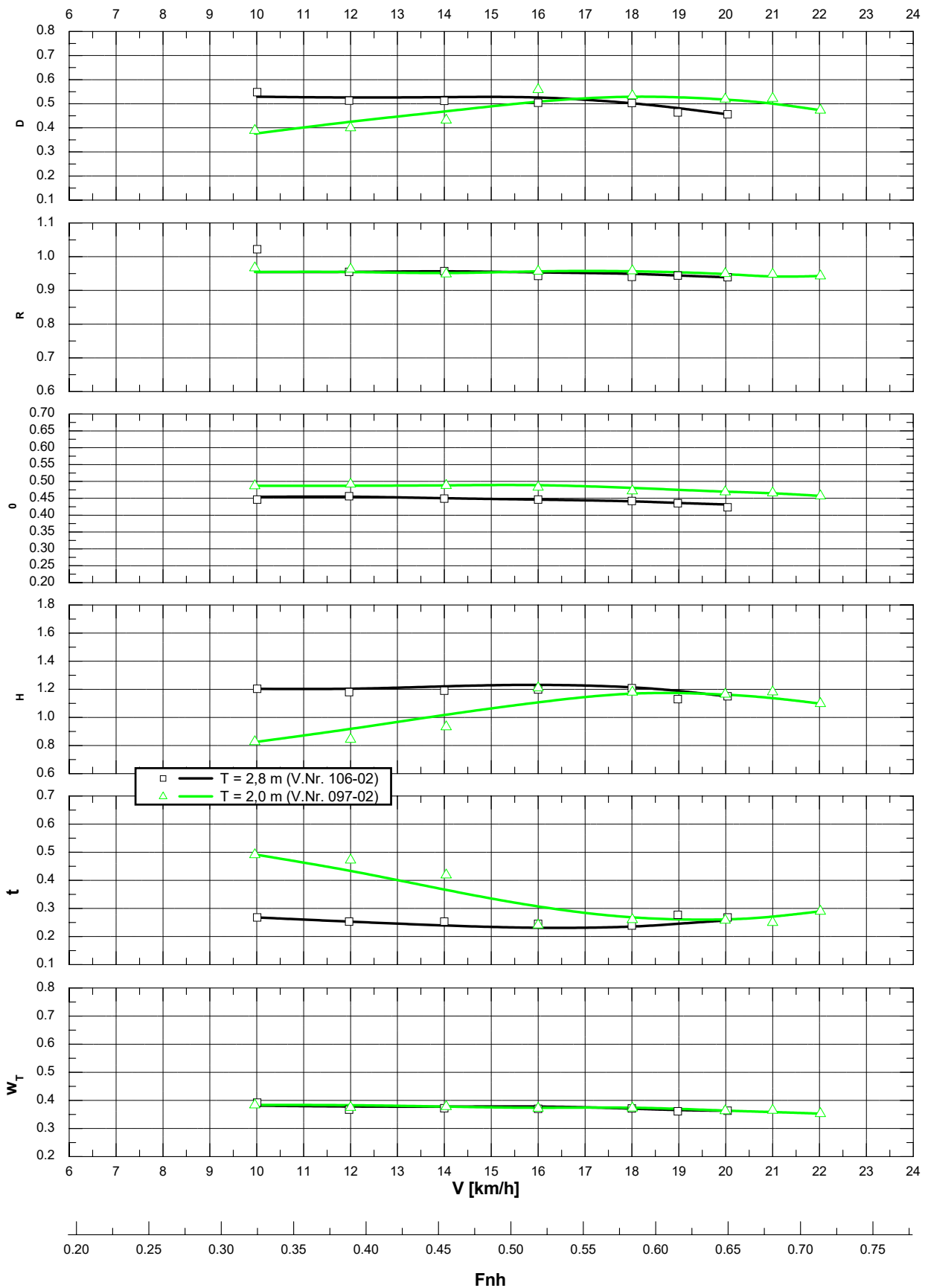
Propulsion - Systematische Versuche
 Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 8), $L_{OA} = 118,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 7,5 \text{ m}$
 seilt. unbegr. Fahrwasser

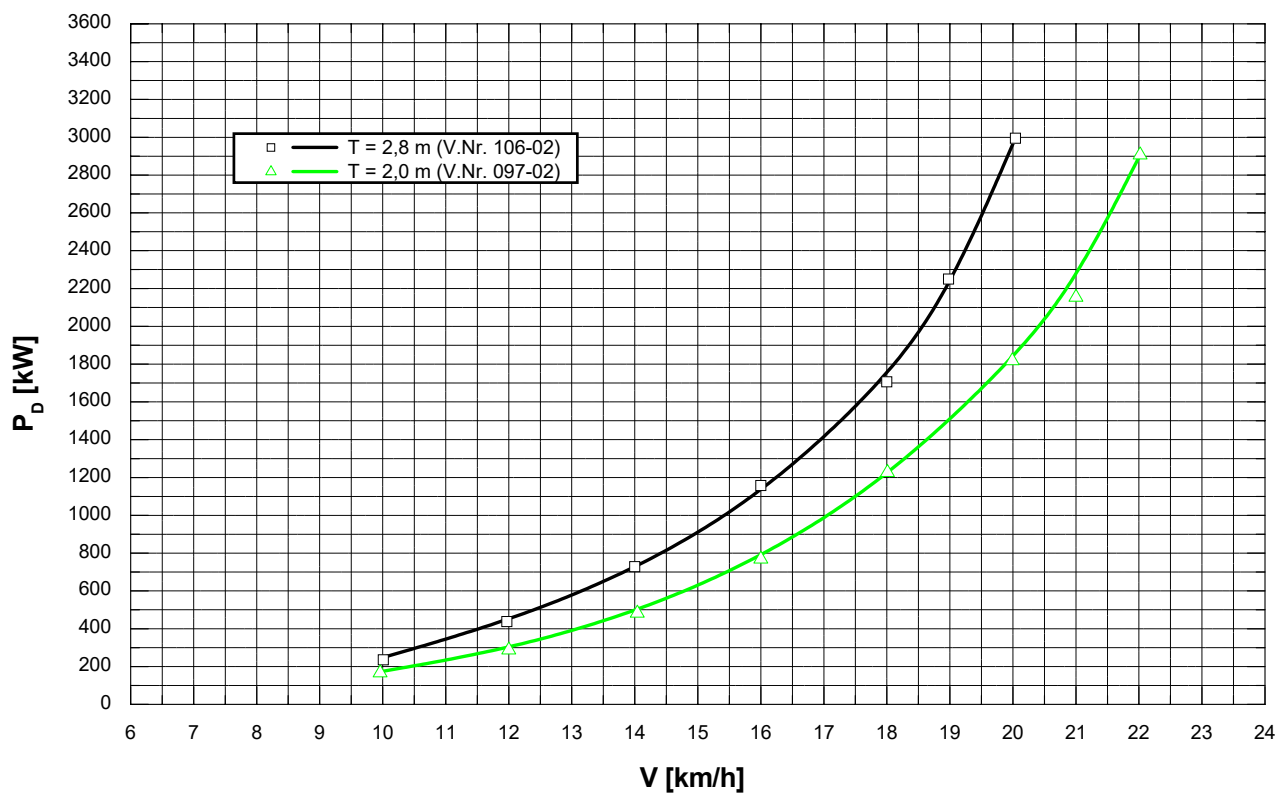
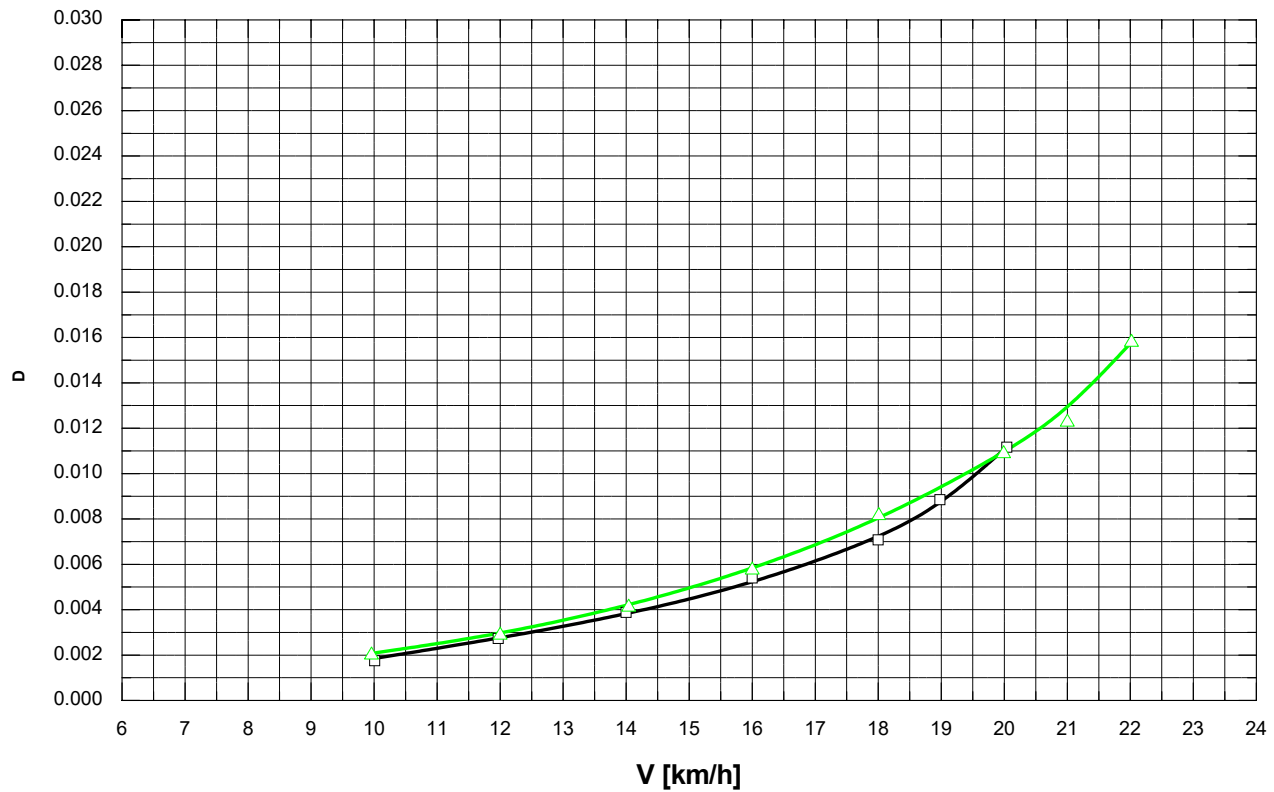
Blatt 1 von 3



Propulsion - Systematische Versuche
 Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 8), $L_{OA} = 118,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 7,5 \text{ m}$
 seittl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 3



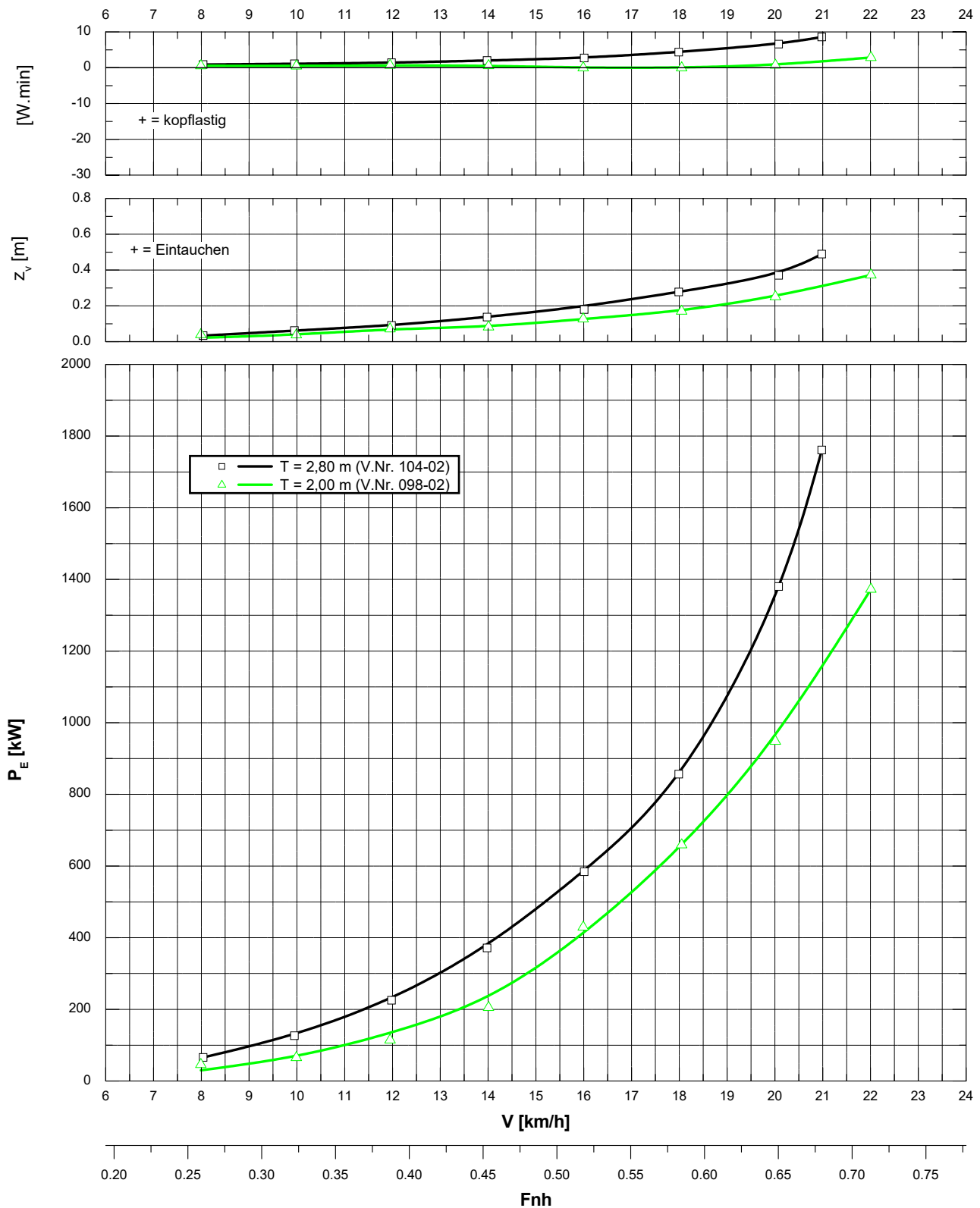
Propulsion - Systematische Versuche
Spezifische Leistung
 Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 8), $L_{OA} = 118,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 7,5 \text{ m}$
 seiti. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 3 von 3



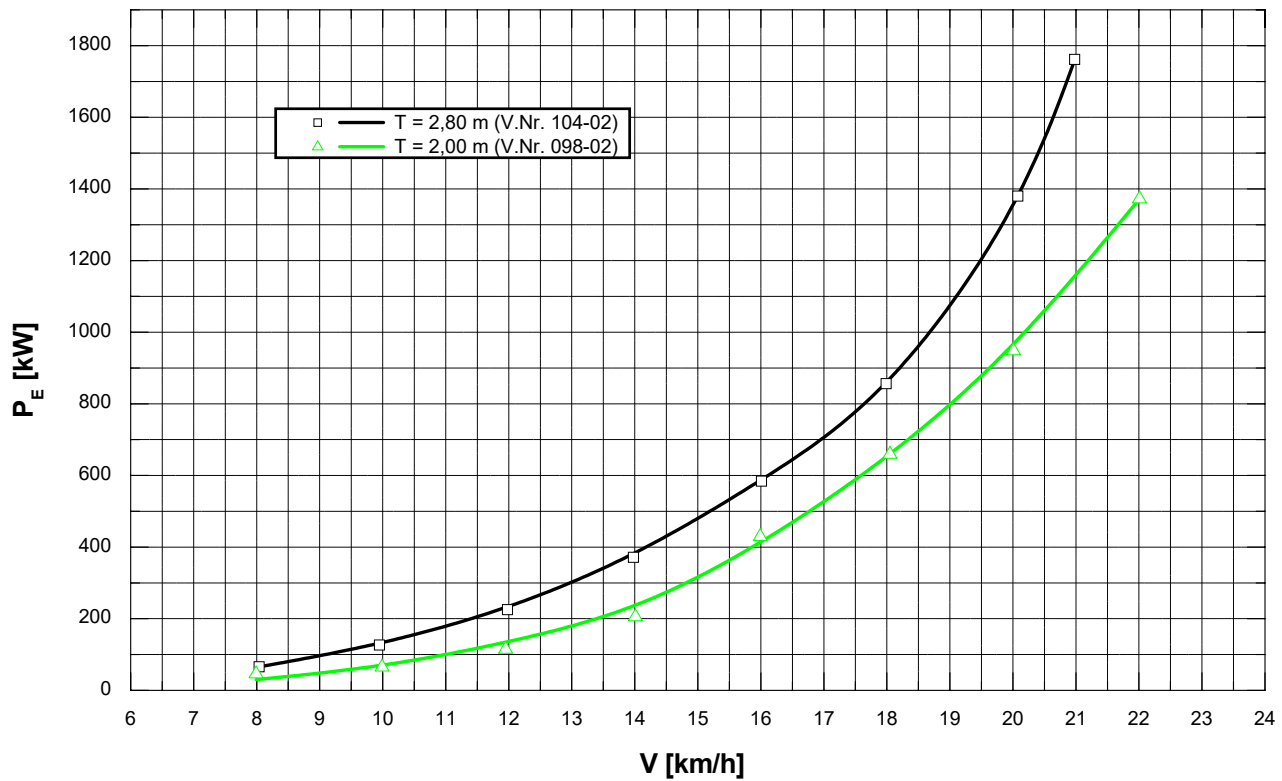
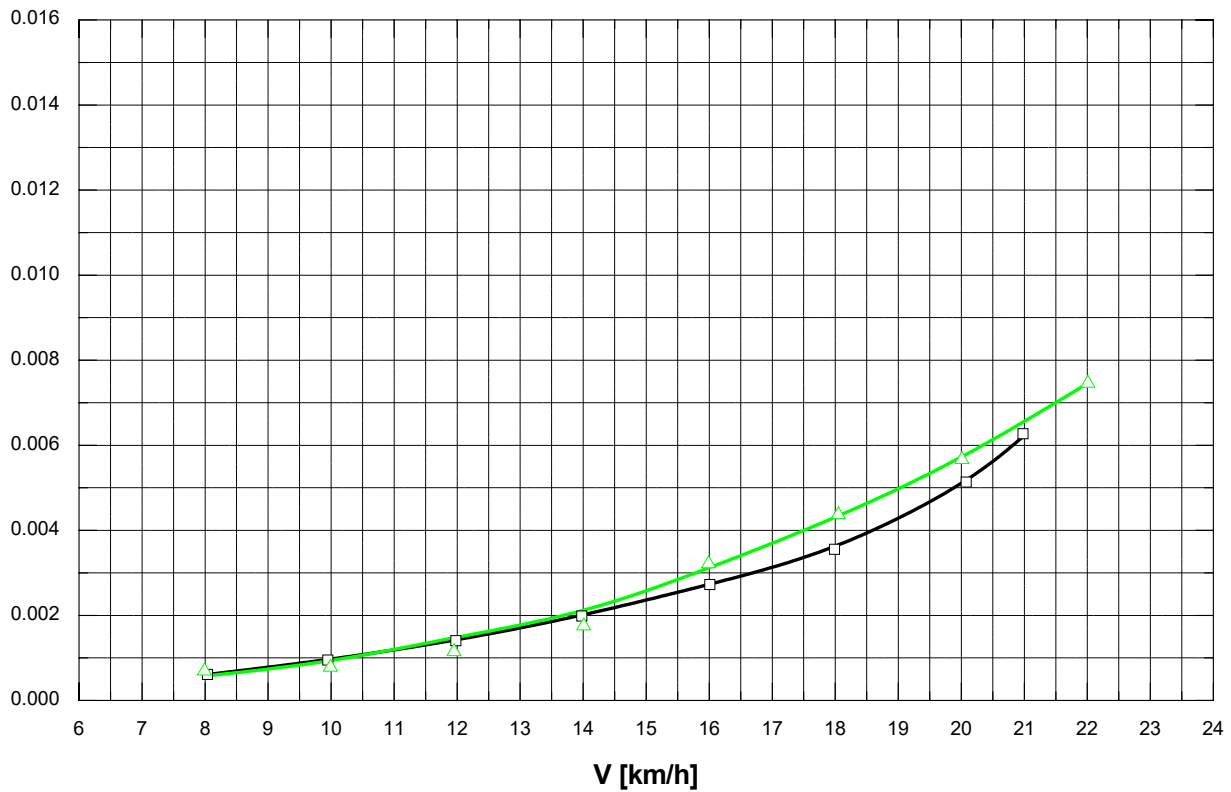
Widerstand - Systematische Versuche -
 Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 8), $L_{OA} = 118,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 7,5 \text{ m}$
 seittl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 1 von 2



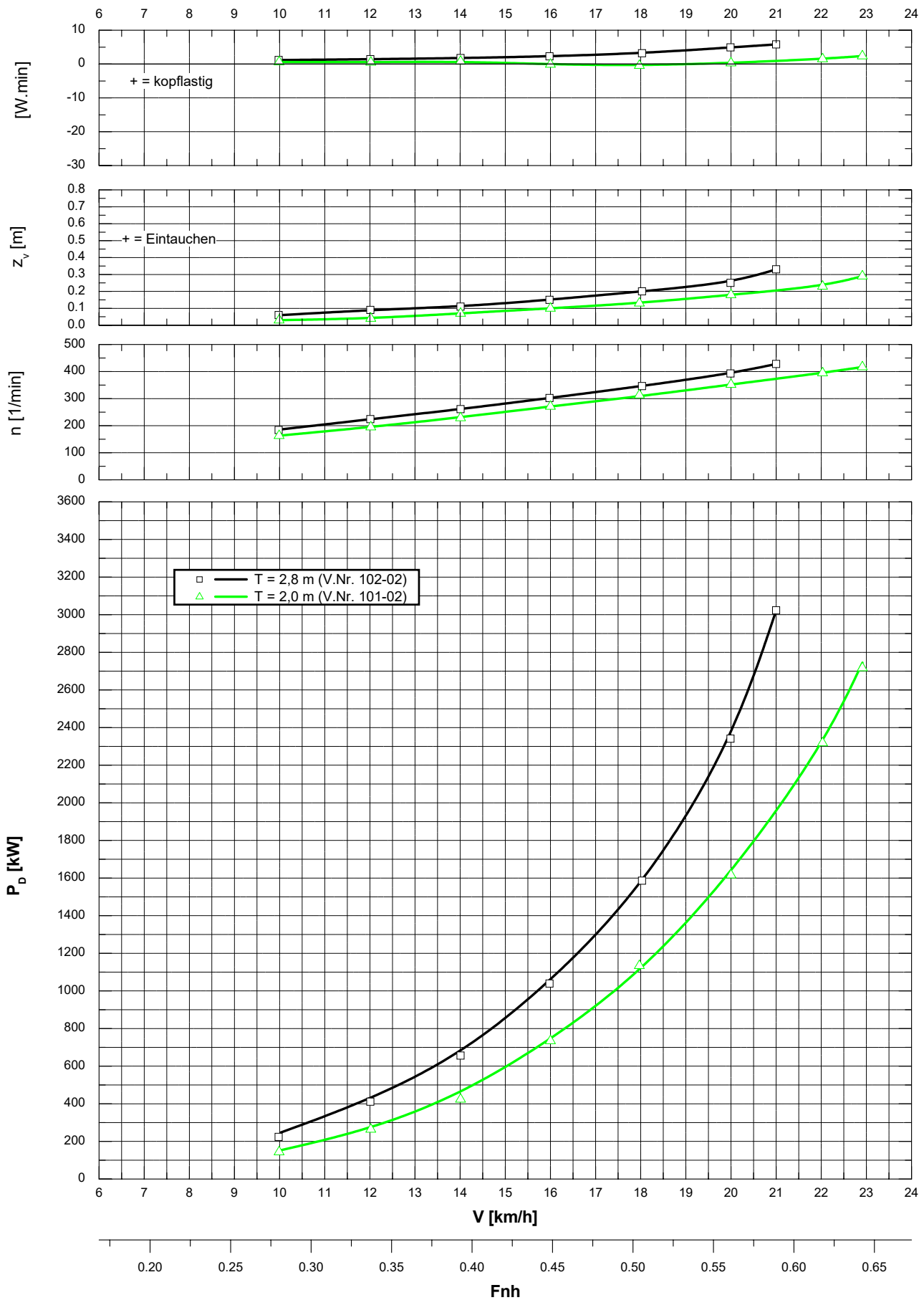
Widerstand - Systematische Versuche -
Spezifischer Widerstand
 Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 8), $L_{OA} = 118,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 7,5 \text{ m}$
 seith. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 2



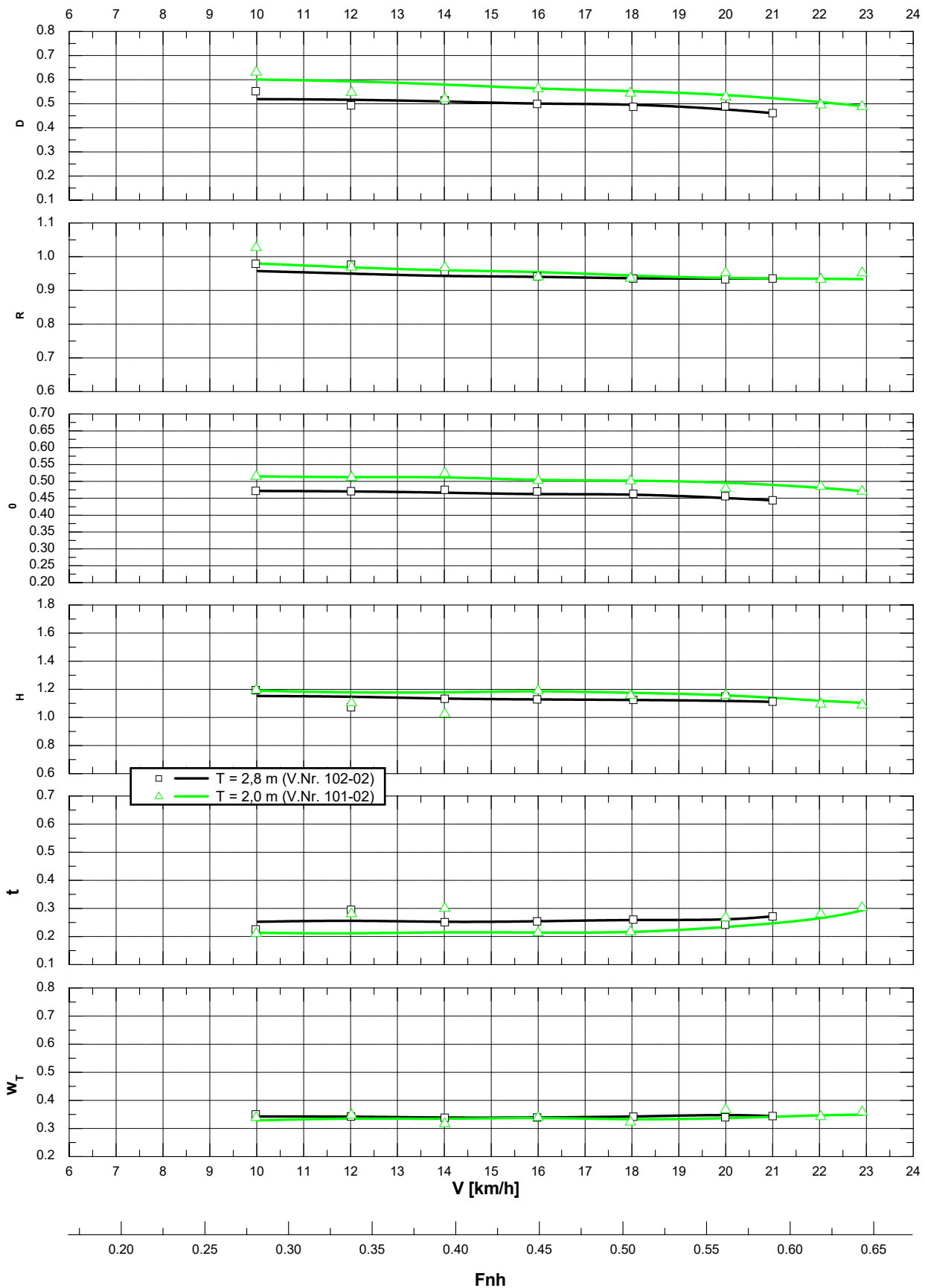
Propulsion - Systematische Versuche
 Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 8), $L_{OA} = 118,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 10,0 \text{ m}$
 seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 1 von 3



Propulsion - Systematische Versuche
 Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 8), $L_{OA} = 118,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 10,0 \text{ m}$
 seittl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 3



Propulsion - Systematische Versuche

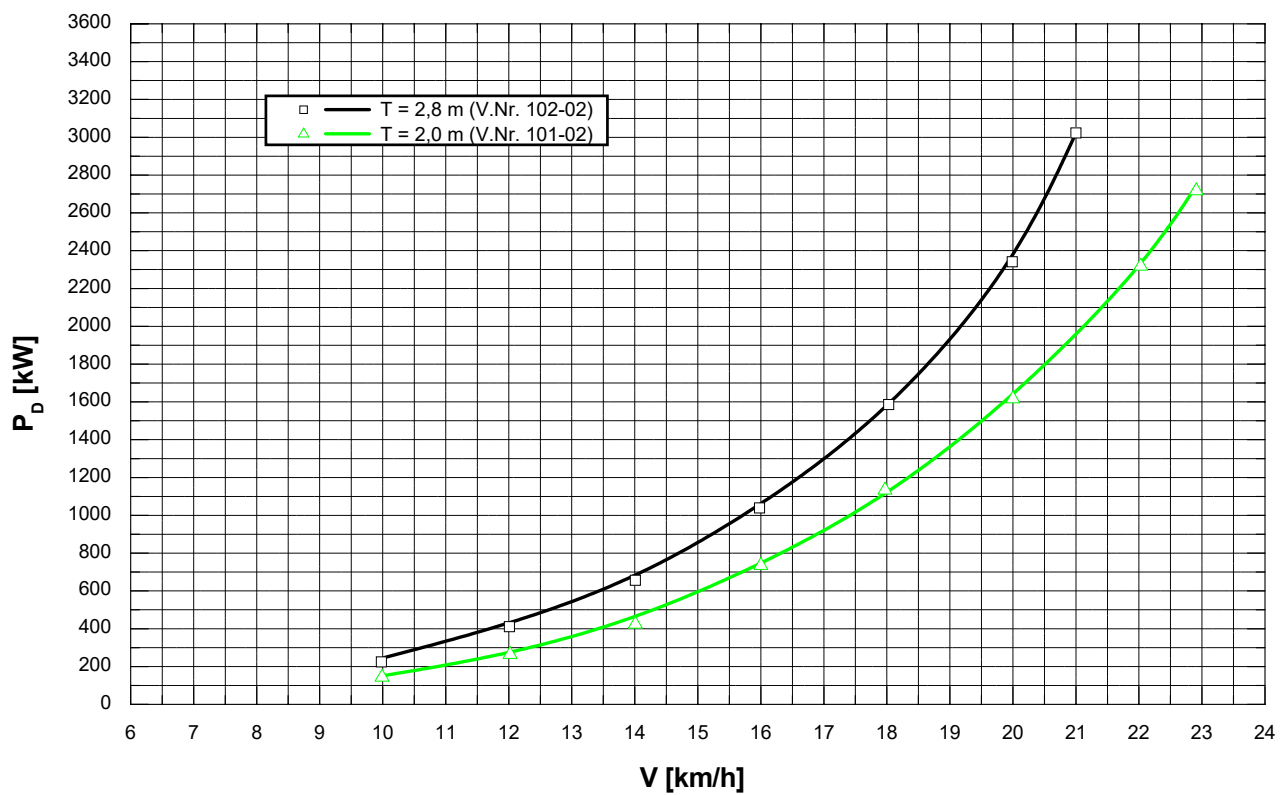
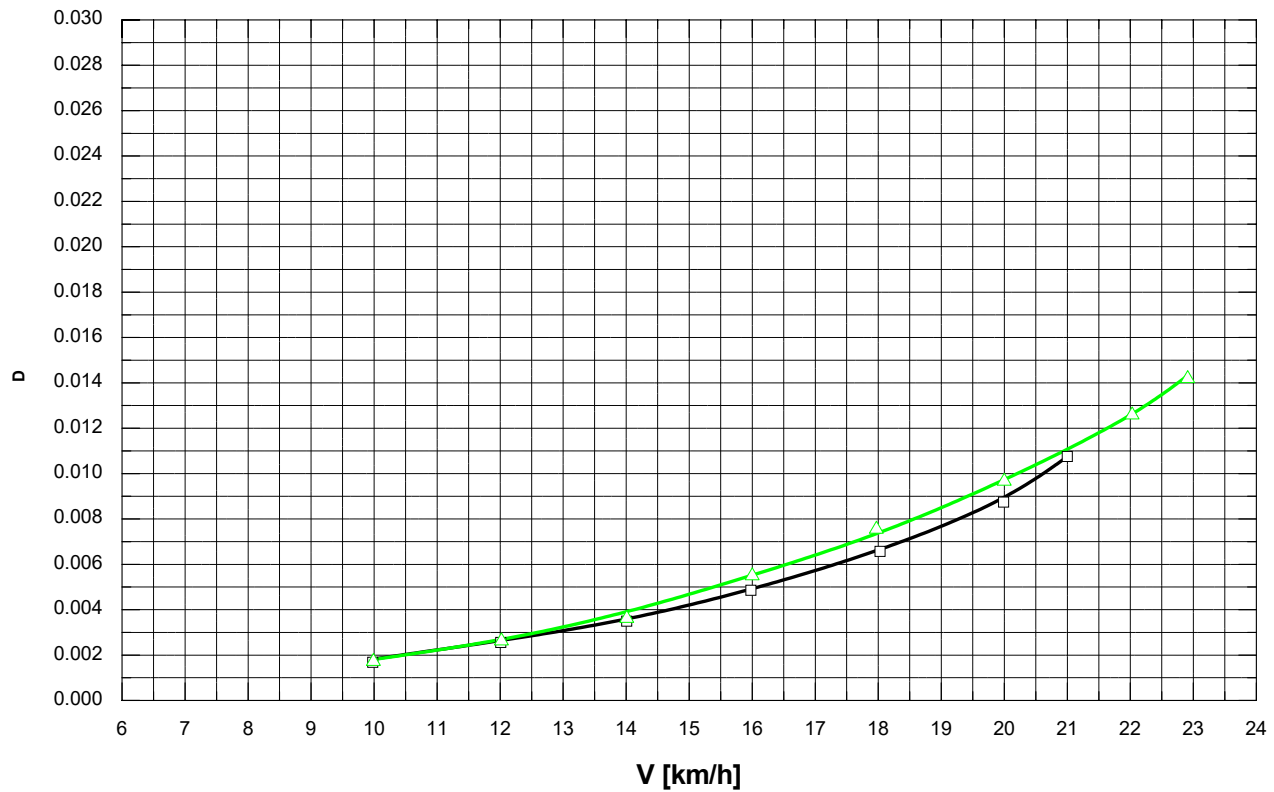
Spezifische Leistung

Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 8), $L_{OA} = 118,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 10,0 \text{ m}$

seitl. unbegr. Fahrwasser

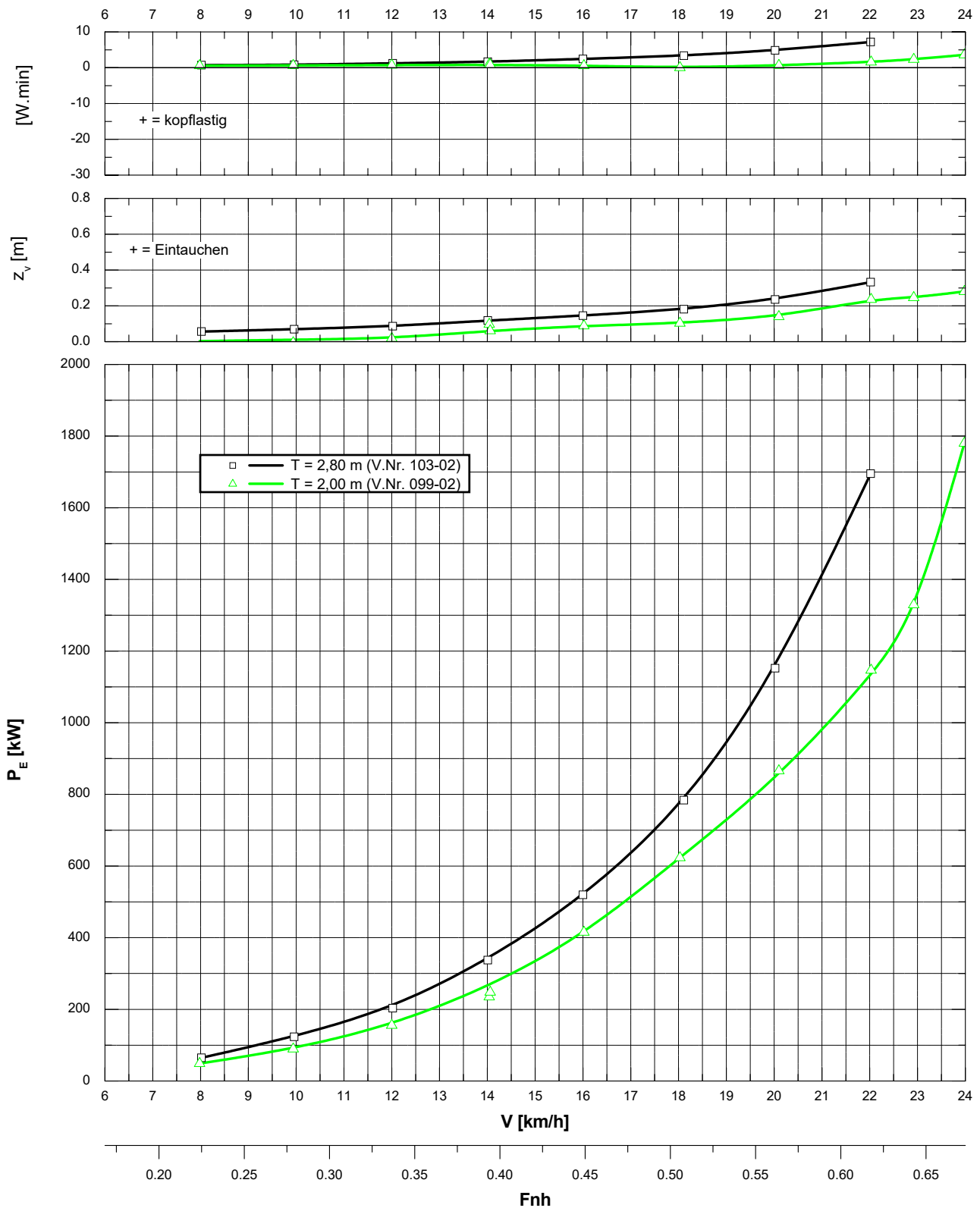
Blatt 3 von 3



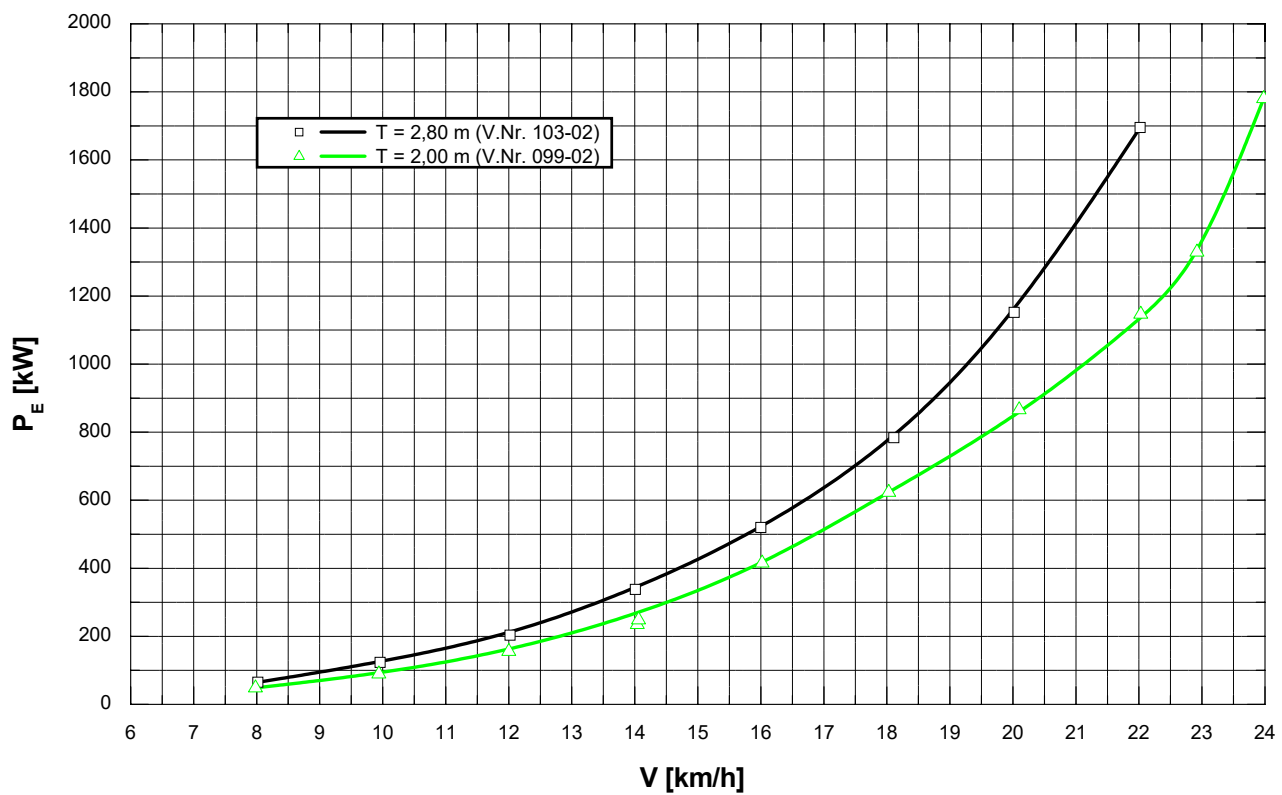
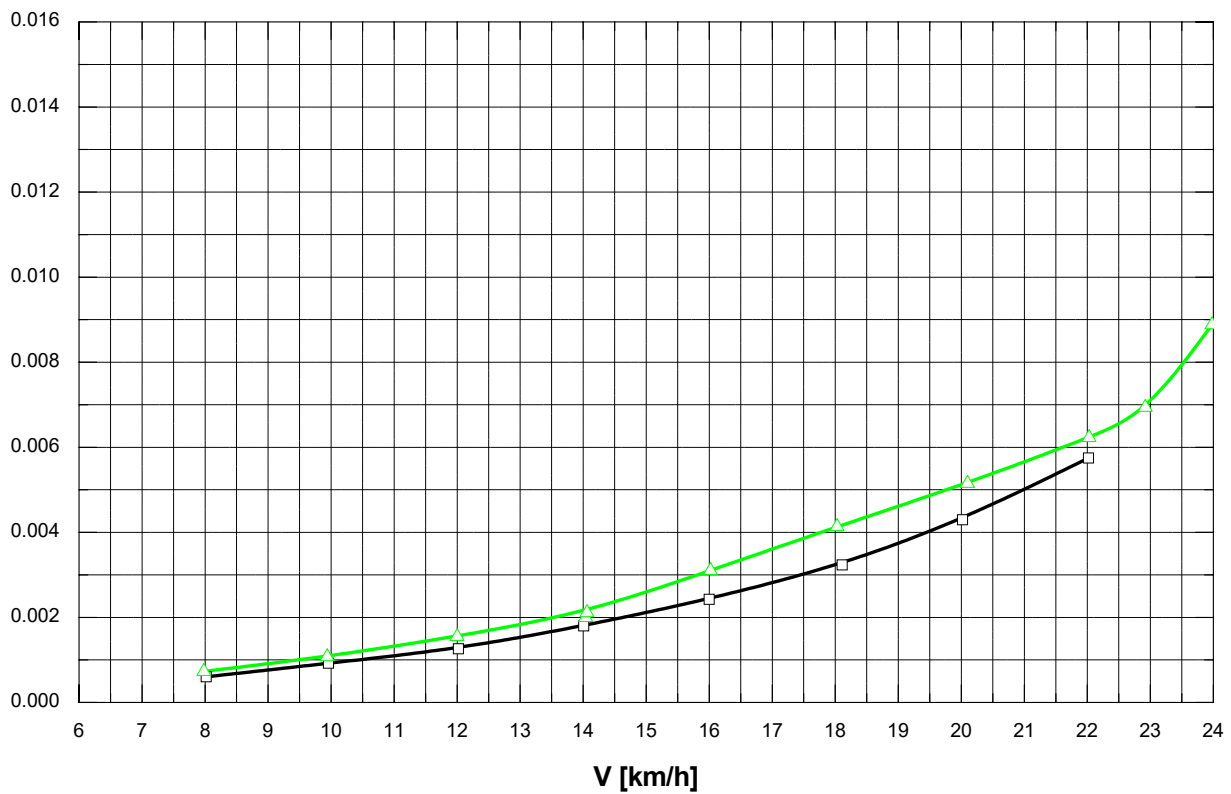
Widerstand - Systematische Versuche -
 Semikat. (Rheinschiff, Formvar.8), $L_{OA} = 118,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$

$h = 10,0 \text{ m}$
 seitl. unbegr. Fahrwasser

Blatt 1 von 2



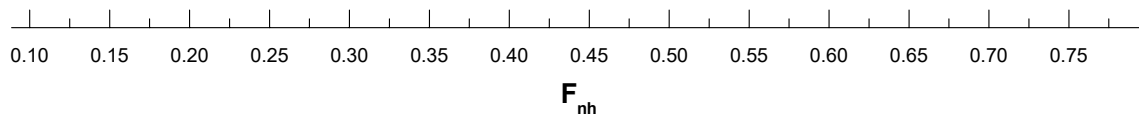
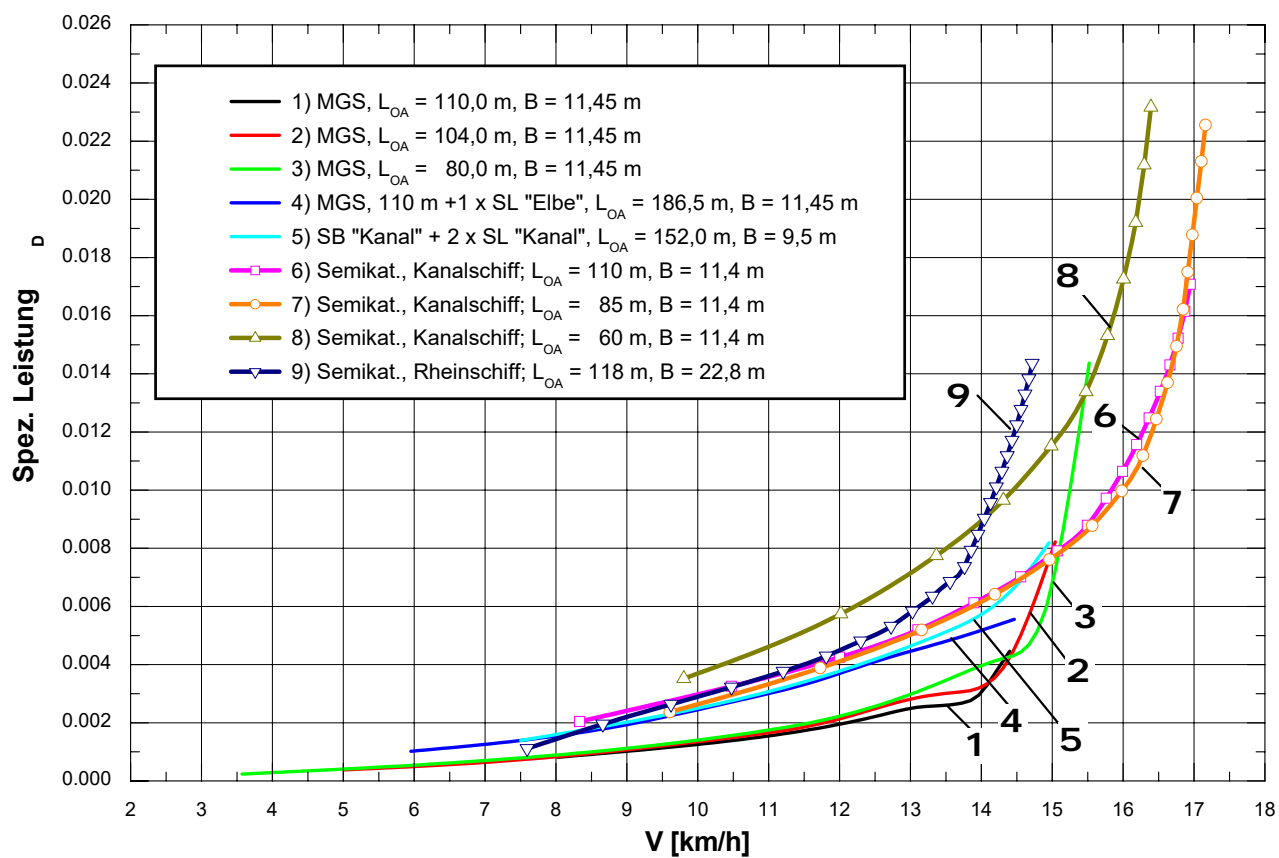
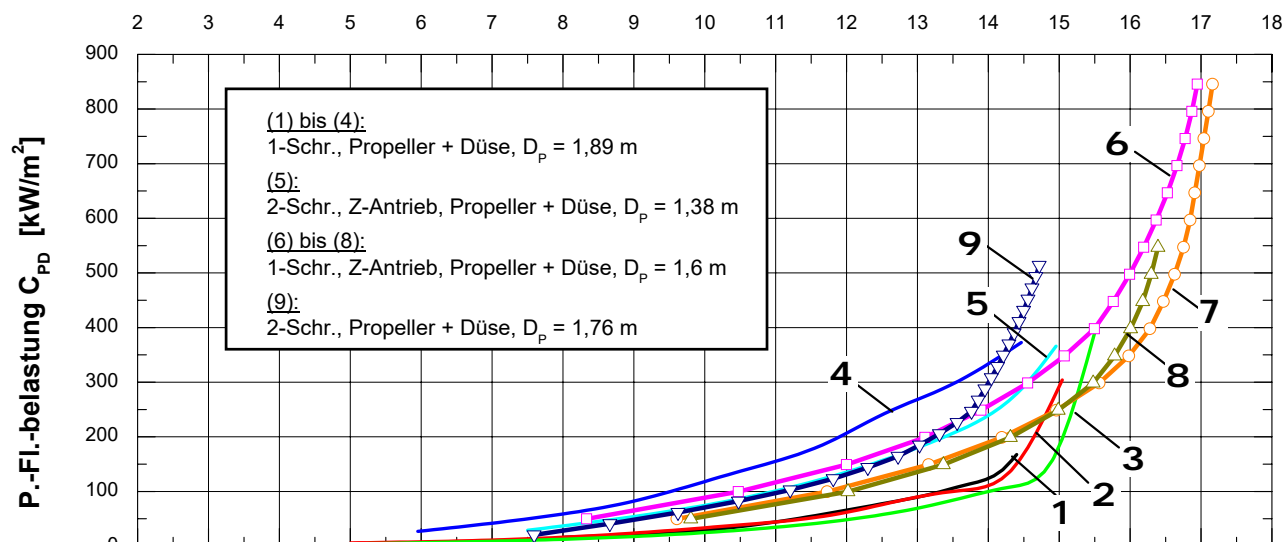
Widerstand - Systematische Versuche -
Spezifischer Widerstand
 Semikat. (Rheinschiff, Formvar.8), $L_{OA} = 118,0 \text{ m}$; $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$
 $h = 10,0 \text{ m}$
 seittl. unbegr. Fahrwasser
 Blatt 2 von 2



Spezifische Leistungswerte u. P.-Flächenbelastung - Semikat. (Kanalschiff, F.variante 6) und konvent. 1-Rumpf-Schiffe - Unbegr. Fahrwasserbreite

$h = 4,0 \text{ m}$

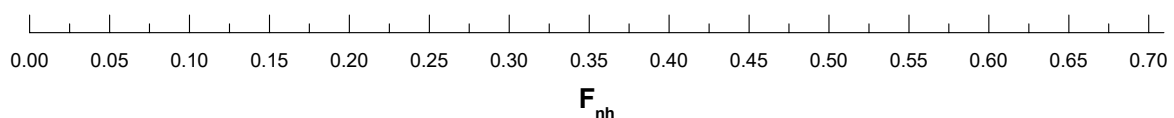
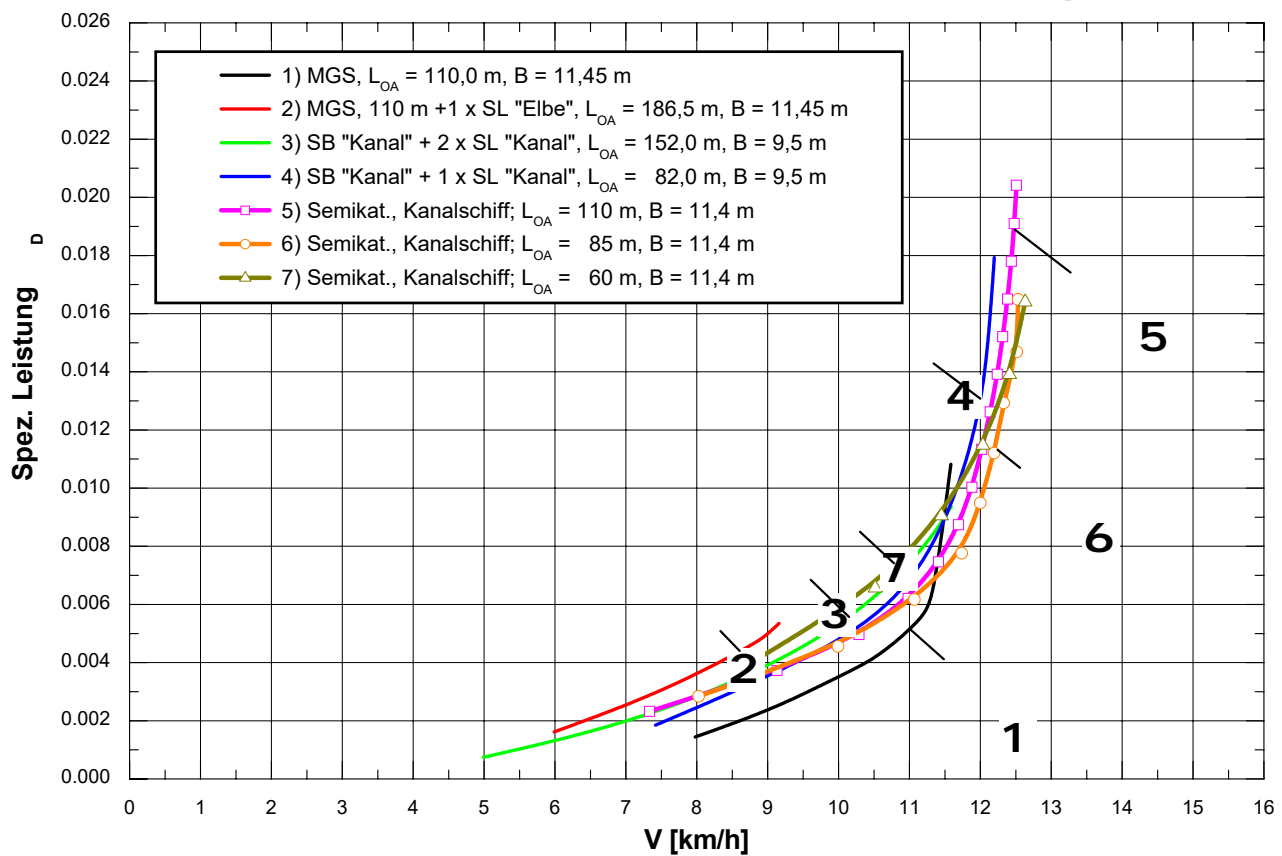
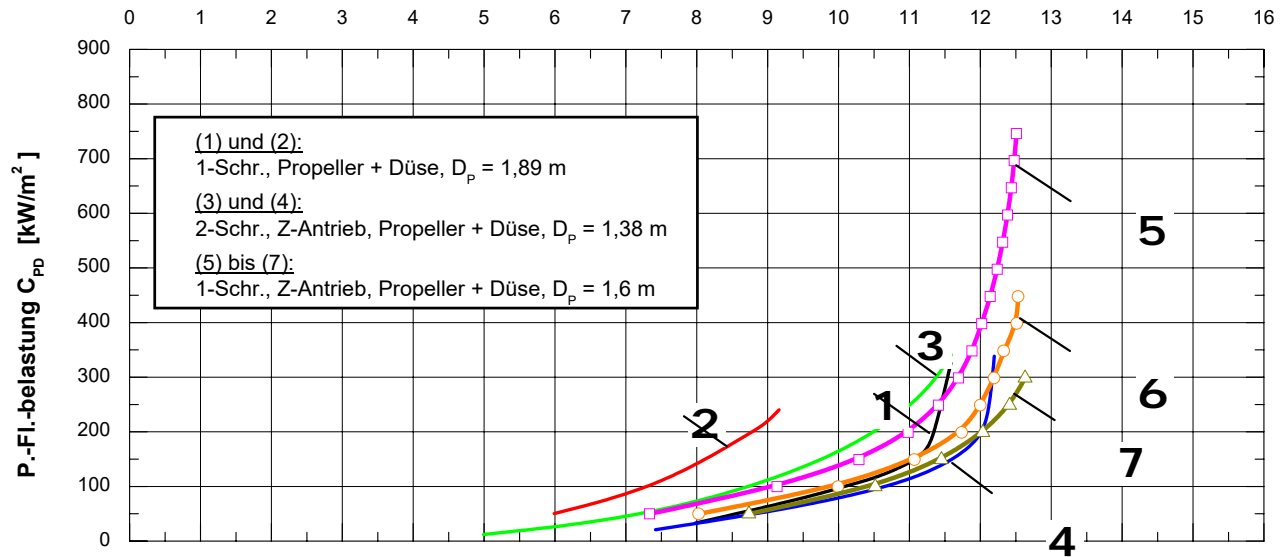
$T = 2,5 \text{ m}$



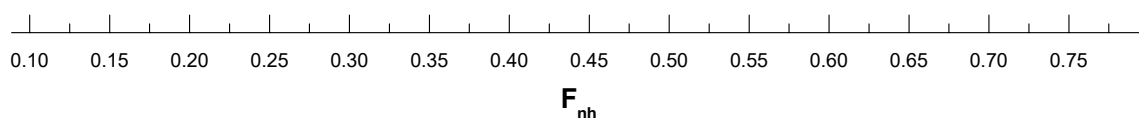
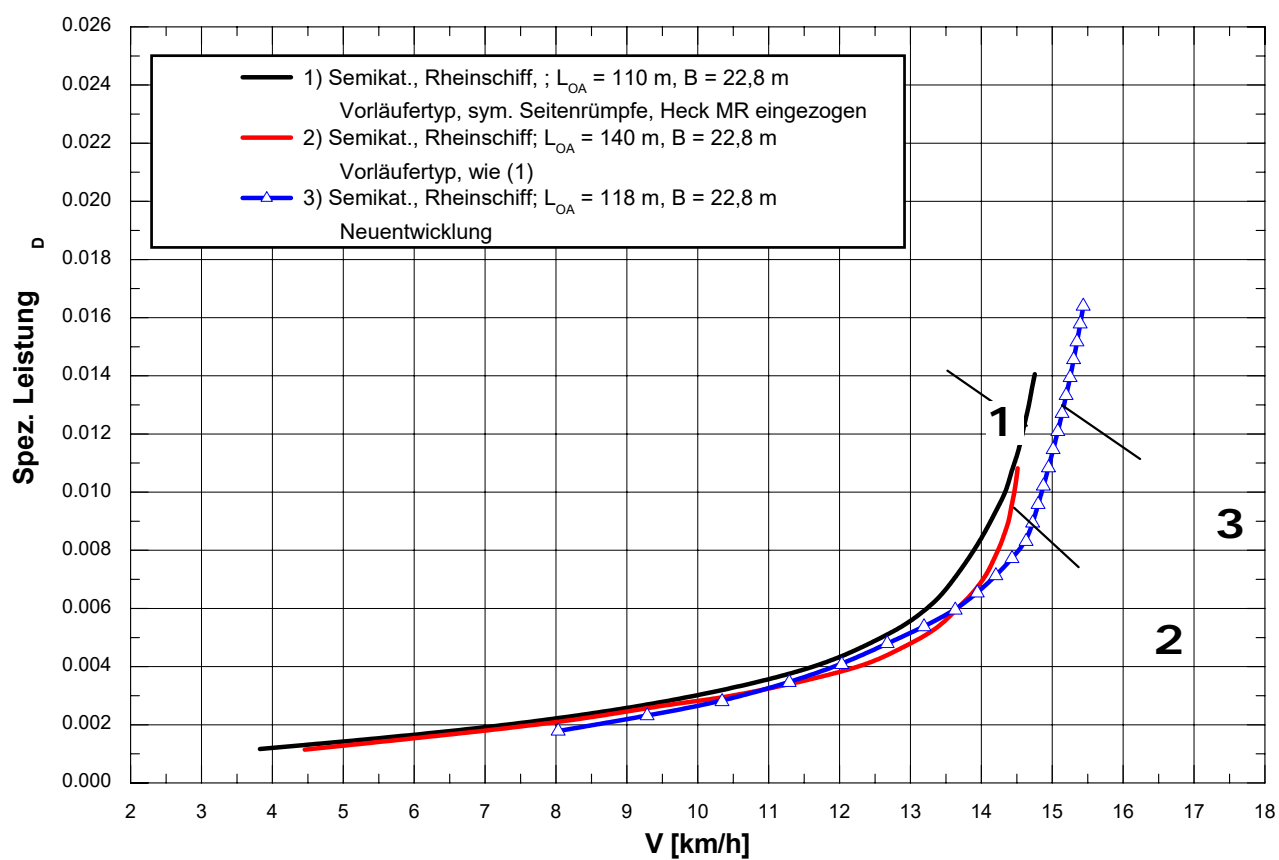
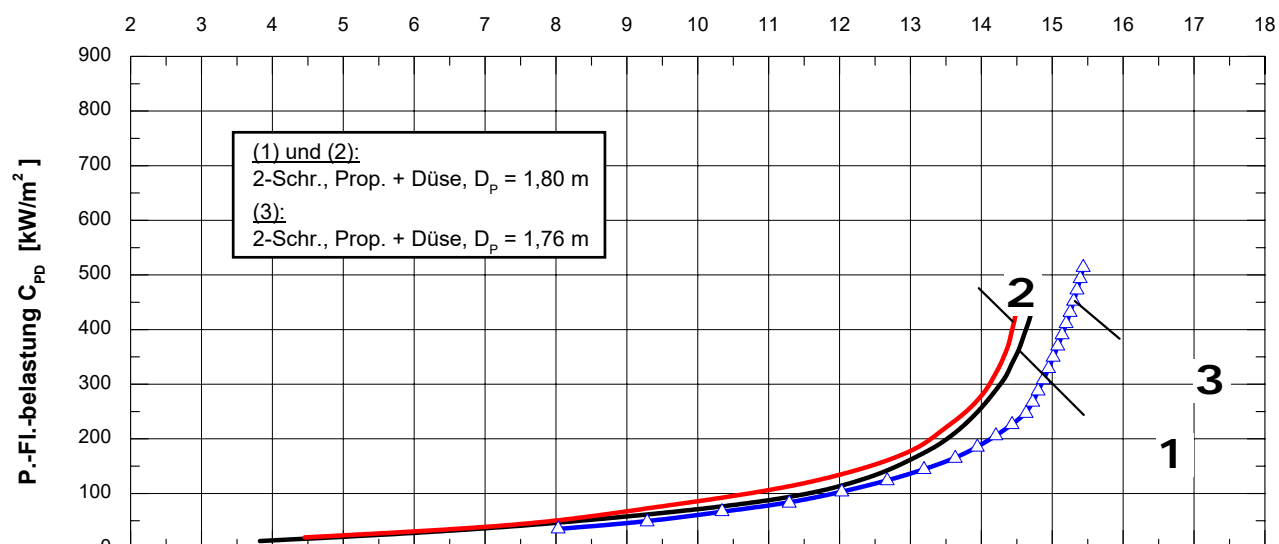
Spezifische Leistungswerte u. P.-Flächenbelastung - Semikat. (Kanalschiff, F.variante 6) und konvent. 1-Rumpf-Schiffe - **Standard-Rechteckkanal, $b_c = 42,0$ m**

$h = 4,0$ m

$T = 2,5$ m



Spezifische Leistungswerte u. P.-Flächenbelastung - Semikat. (Rheinschiff, F.variante 8) und Vorläufertyp (VBD 1992) - Unbegr. Fahrwasserbreite $h = 4,0 \text{ m}$ $T = 2,2 \text{ m}$



Bodendruck-Längsschnitt *Mitte Schiff* ($2Y/b_c = 0,0$)

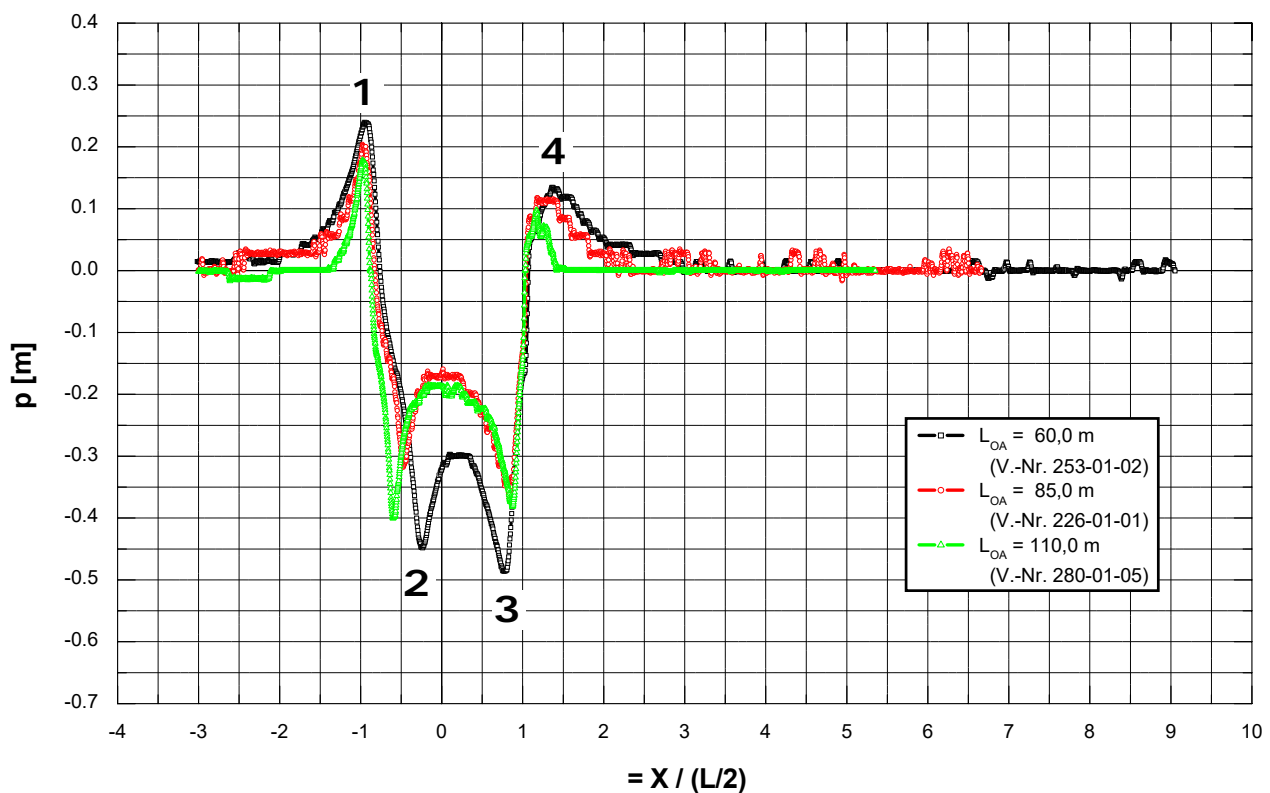
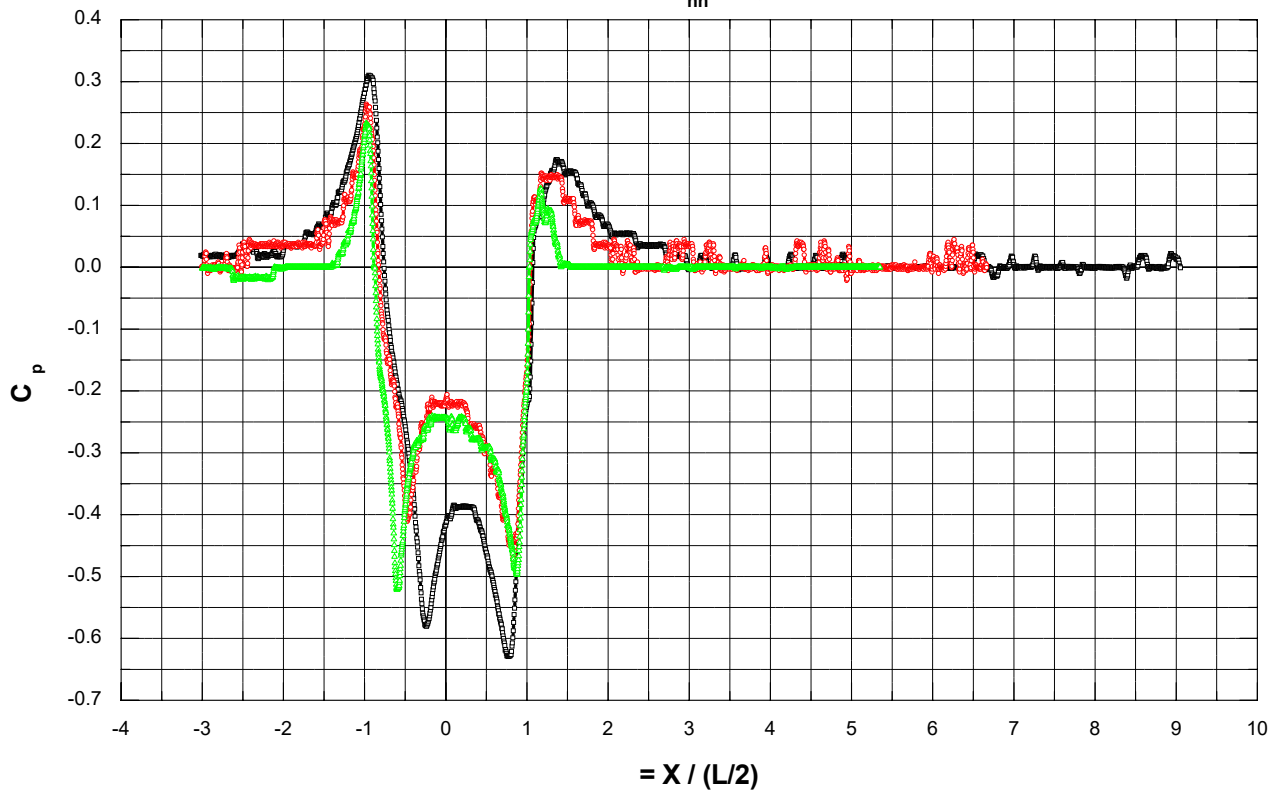
Messung im großen Flachw.-Tank, $b_c = 160,0$ m

- Hochgerechnete und dimensionslose Darstellung -

Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6)

L-Variation, $T = 2,8$ m, $h = 4,0$ m

$$F_{nh} = 0,631$$



Wellen-Längsschnitt in Ufernähe ($2Y/b_c = 0,96$)

Doppelamplitude von Bug- und Heckwellenfront

Messung im grossen Flachw.-Tank

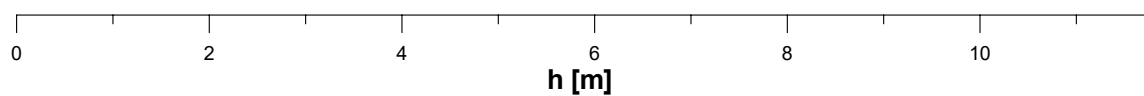
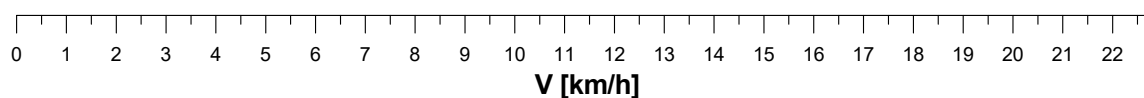
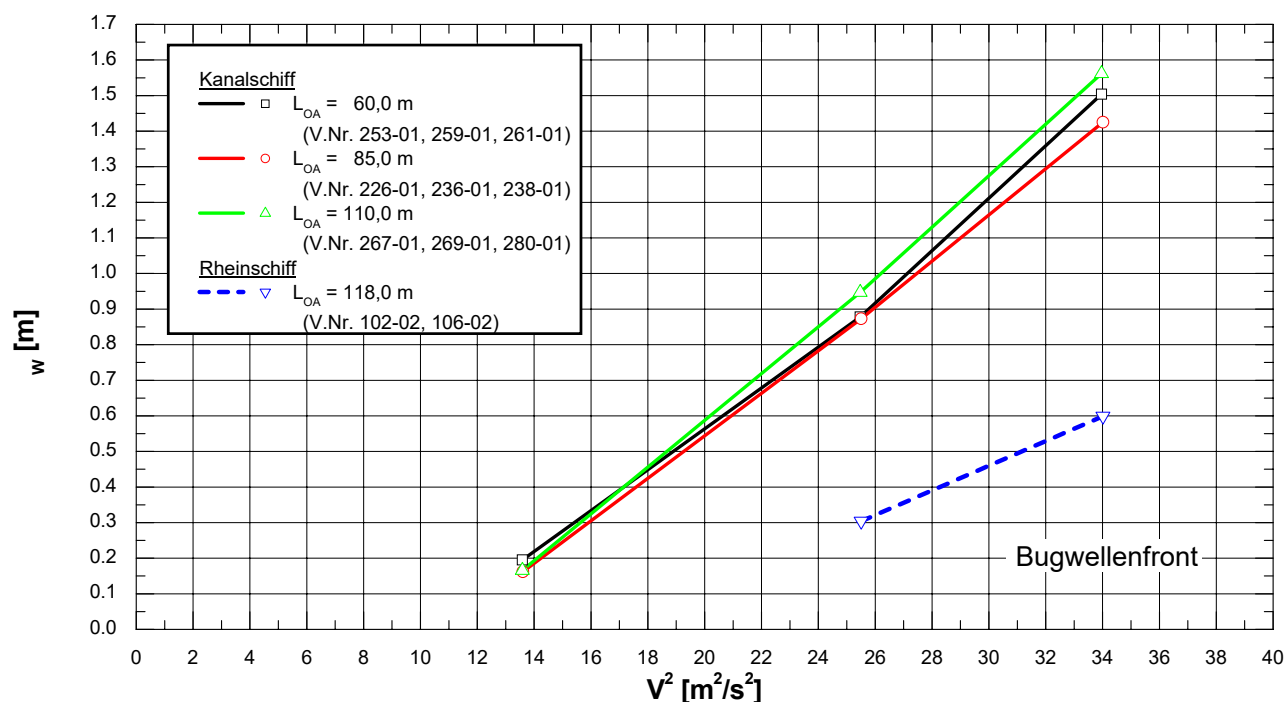
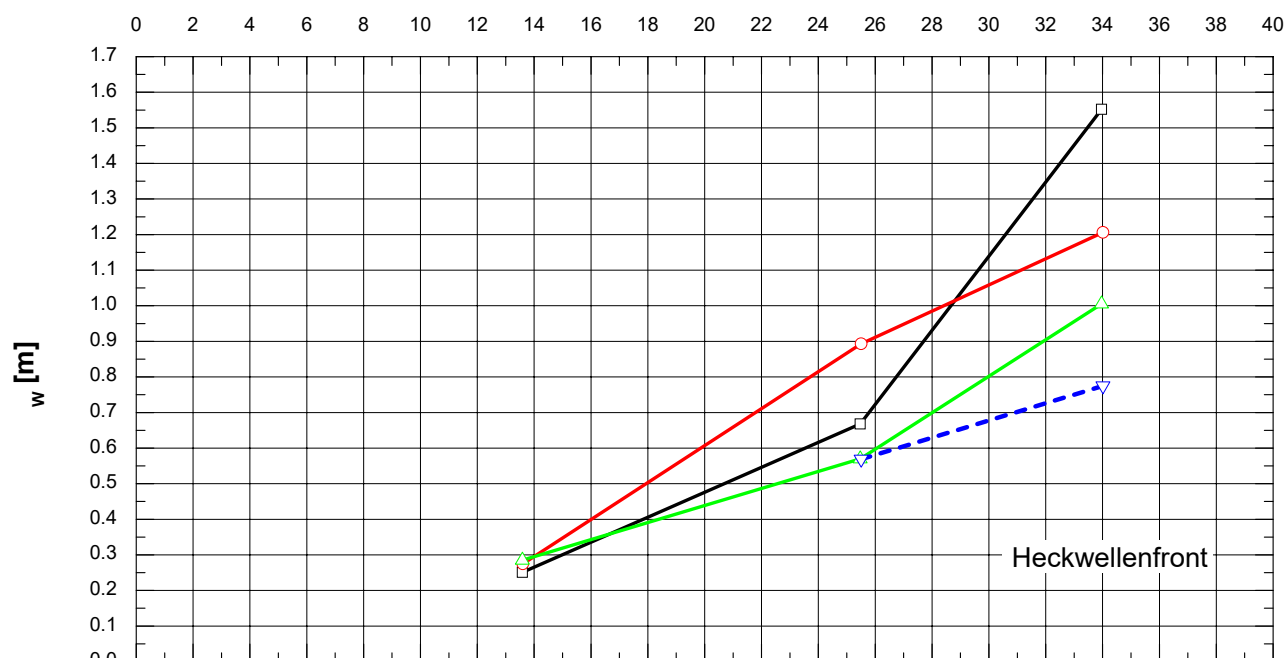
- Grossausführung, $b_c = 160$ m -

Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6)

Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 8)

L- und h-Variation, $T = 2,8$ m

$F_{nh} = 0,589 = \text{konst.}$



Bodendruck-Längsschnitt **Mitte Schiff** ($2Y/b_c = 0$)

Extremwerte im Vor- u. Hinterschiffsbereich

Messung im grossen Flachw.-Tank

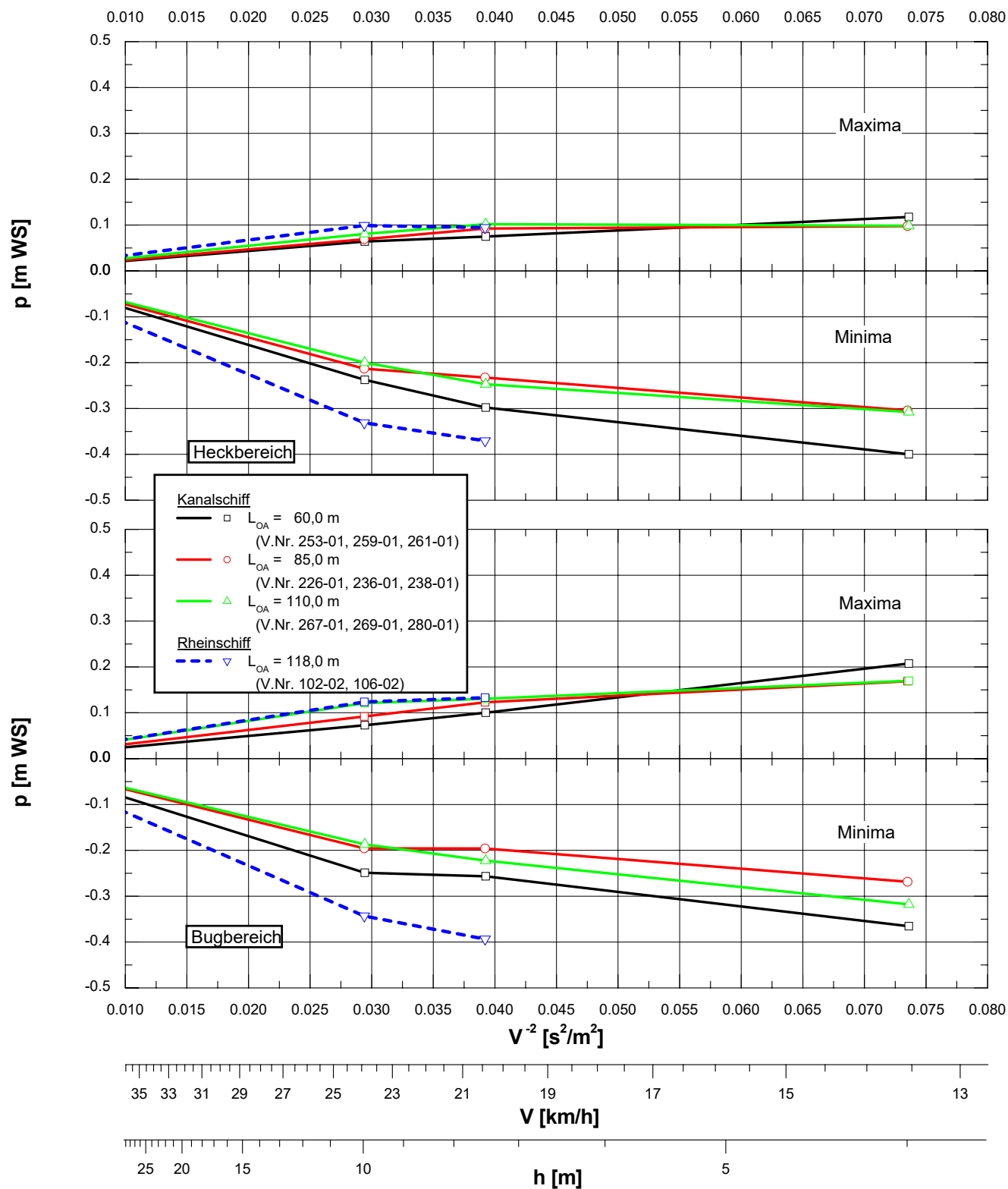
- Grossausführung, $b_c = 160$ m -

Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6)

Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 8)

L- und h-Variation, $T = 2,8$ m

$F_{nh} = 0,589 = \text{konst.}$



Wellen-Längsschnitt in Ufernähe ($2Y/b_c = 0,96$)

Doppelamplitude von Bug- und Heckwellenfront

Messung im grossen Flachw.-Tank

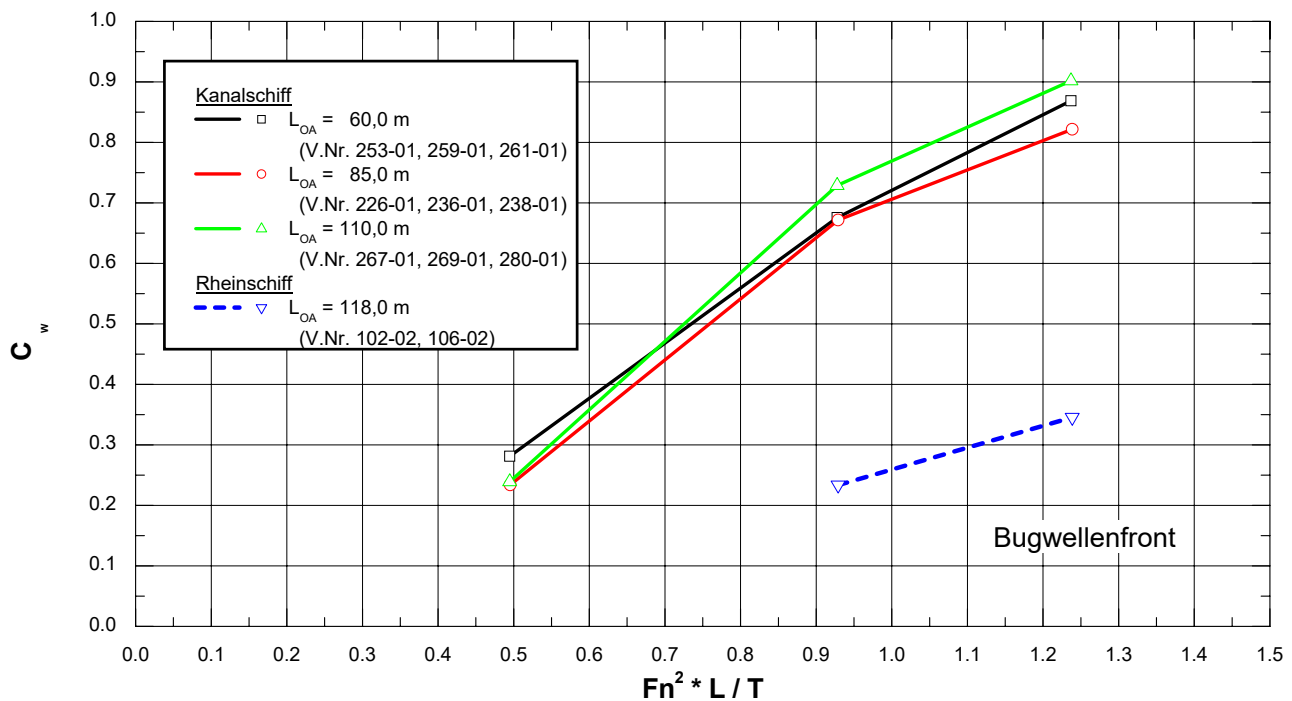
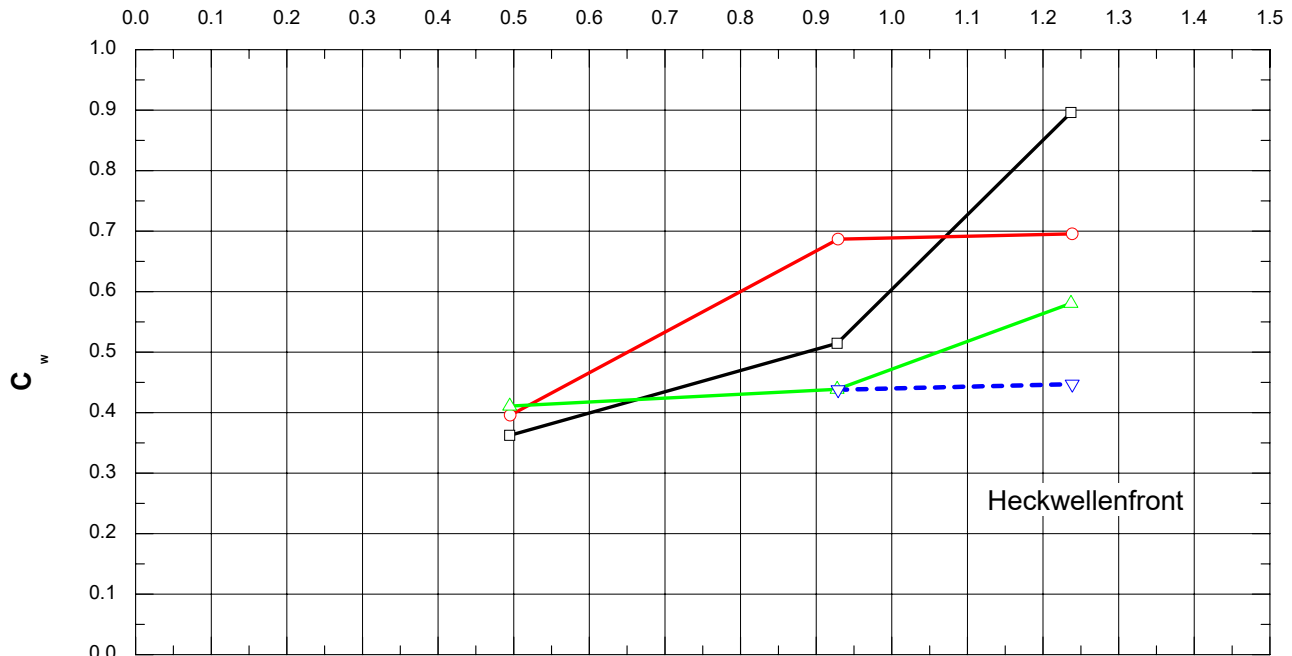
- Dimensionslose Darstellung, $b_c = 160$ m -

Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6)

Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 8)

L- und h-Variation, $T = 2,8$ m

$F_{nh} = 0,589 = \text{konst.}$



$F_n^2 * L / T$

V [km/h]

h [m]

Bodendruck-Längsschnitt *Mitte Schiff* ($2Y/b_c = 0$)

Extremwerte im Vor- u. Hinterschiffsbereich

Messung im grossen Flachw.-Tank

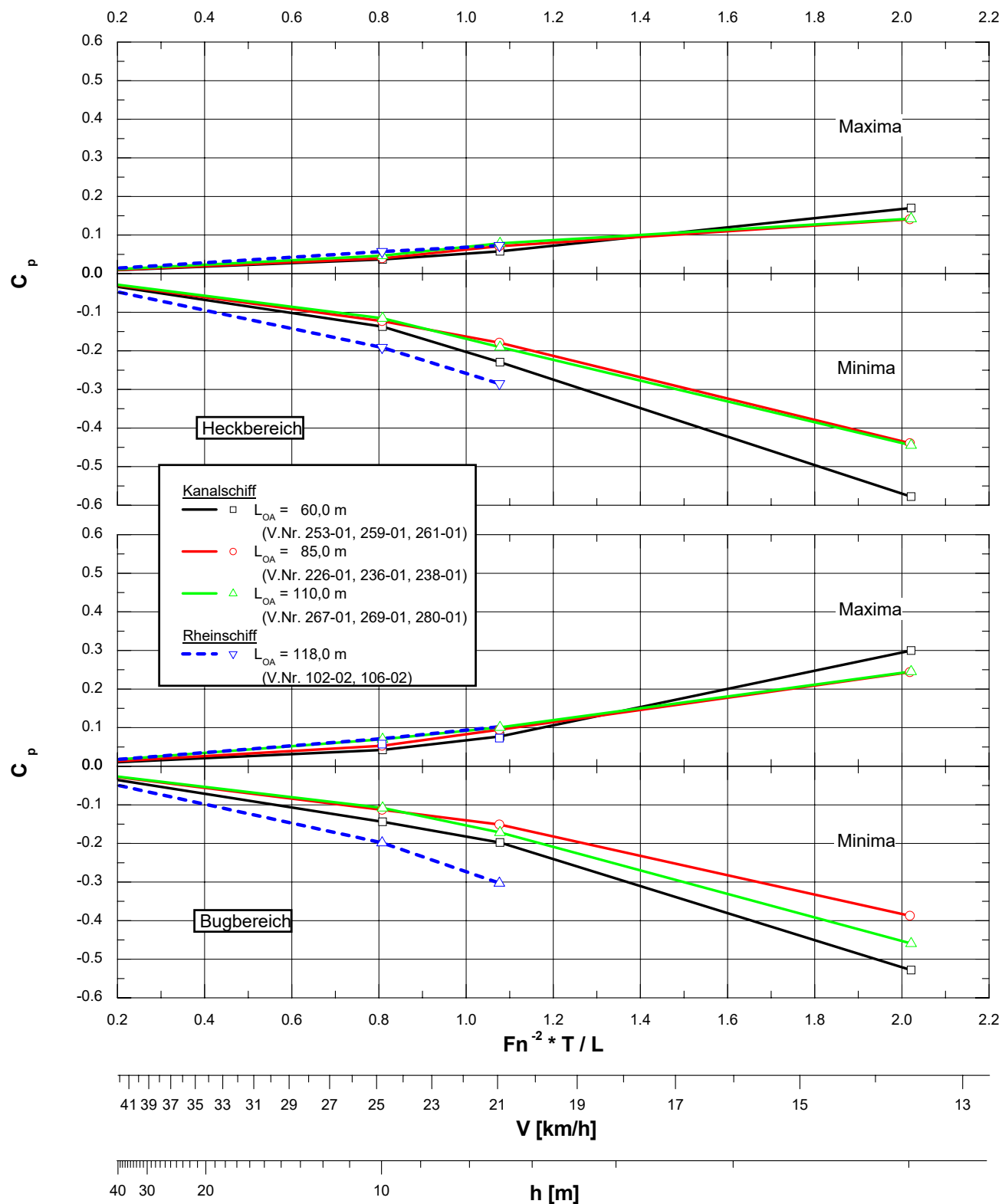
- Dimensionslose Darstellung, $b_c = 160$ m -

Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6)

Semikat. (Rheinschiff, Formvar. 8)

L- und h-Variation, $T = 2,8$ m

$F_{nh} = 0,589 = \text{konst.}$



Vergleich Semikatamaran - Einrumpfschiff Wellen-Längsschnitt im Strömungsfernfeld ($2Y/b_c = 0,5$)

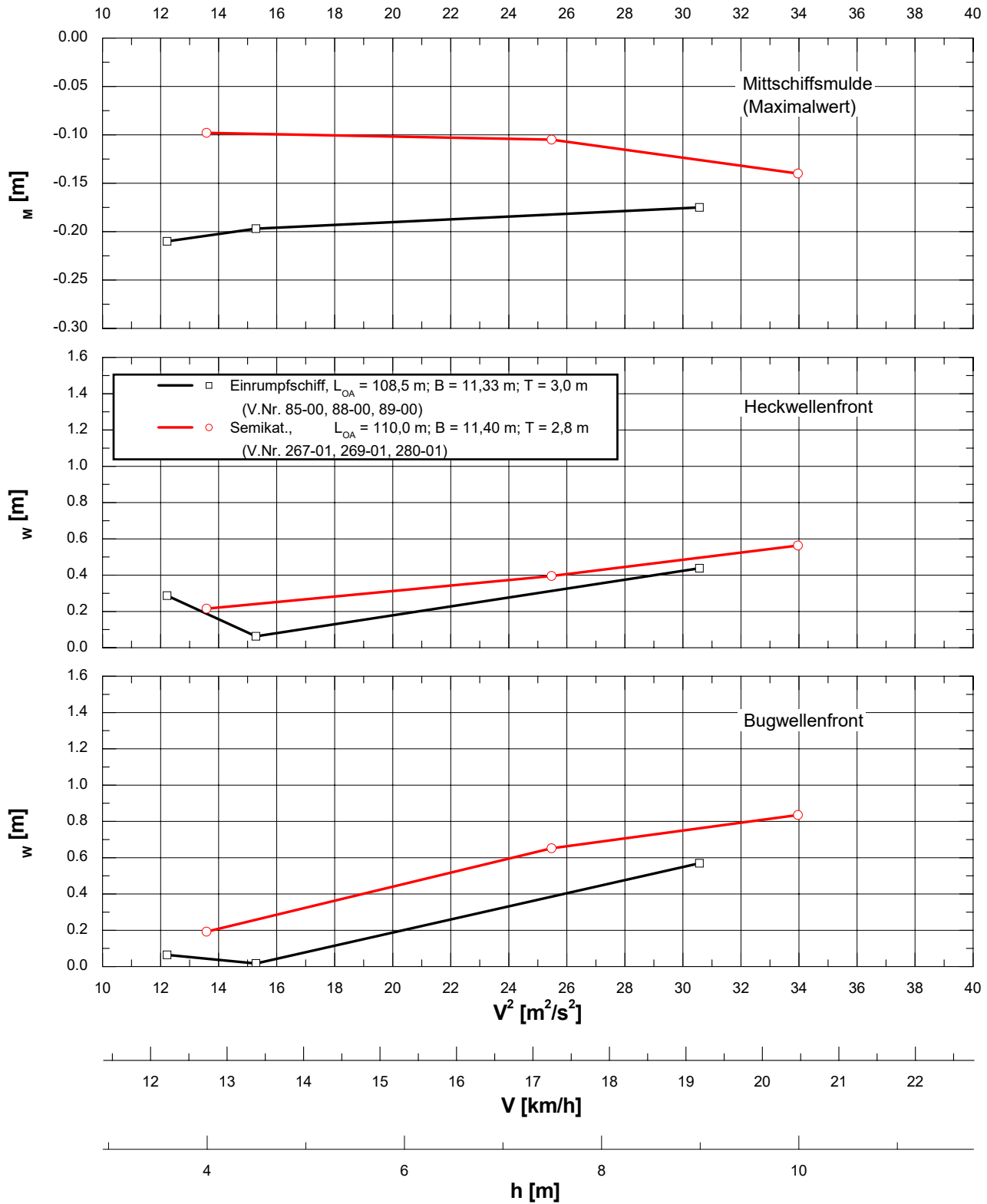
Messung im grossen Flachw.-Tank

- Grossausführung, $b_c = 160$ m -

Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6)

V- und h-Variation

$F_{nh} = 0,589 = \text{konst.}$



Vergleich Semikatamaran - Einrumpfschiff

Bodendruck-Längsschnitt **Mitte Schiff** ($2Y/b_c = 0$)

Extremwerte in Vor- u. Hinterschiffsbereich

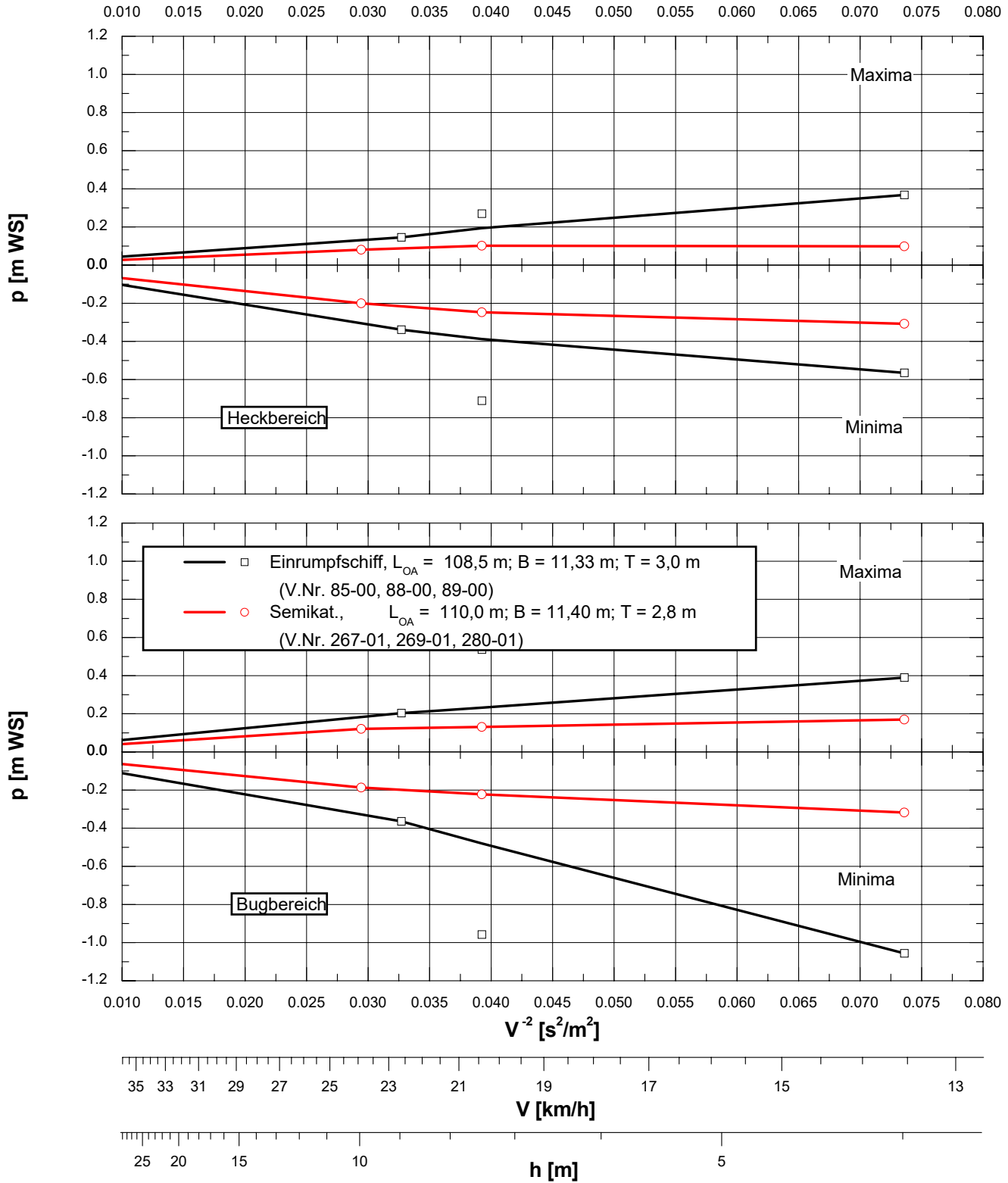
Messung im grossen Flachw.-Tank

- Grossausführung, $b_c = 160$ m -

Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6)

V- und h-Variation

$F_{nh} = 0,589 = \text{konst.}$



Vergleich Semikatamaran - Einrumpfschiff

Wellen-Längsschnitt in Ufernähe ($2Y/b_c = 0,914$)

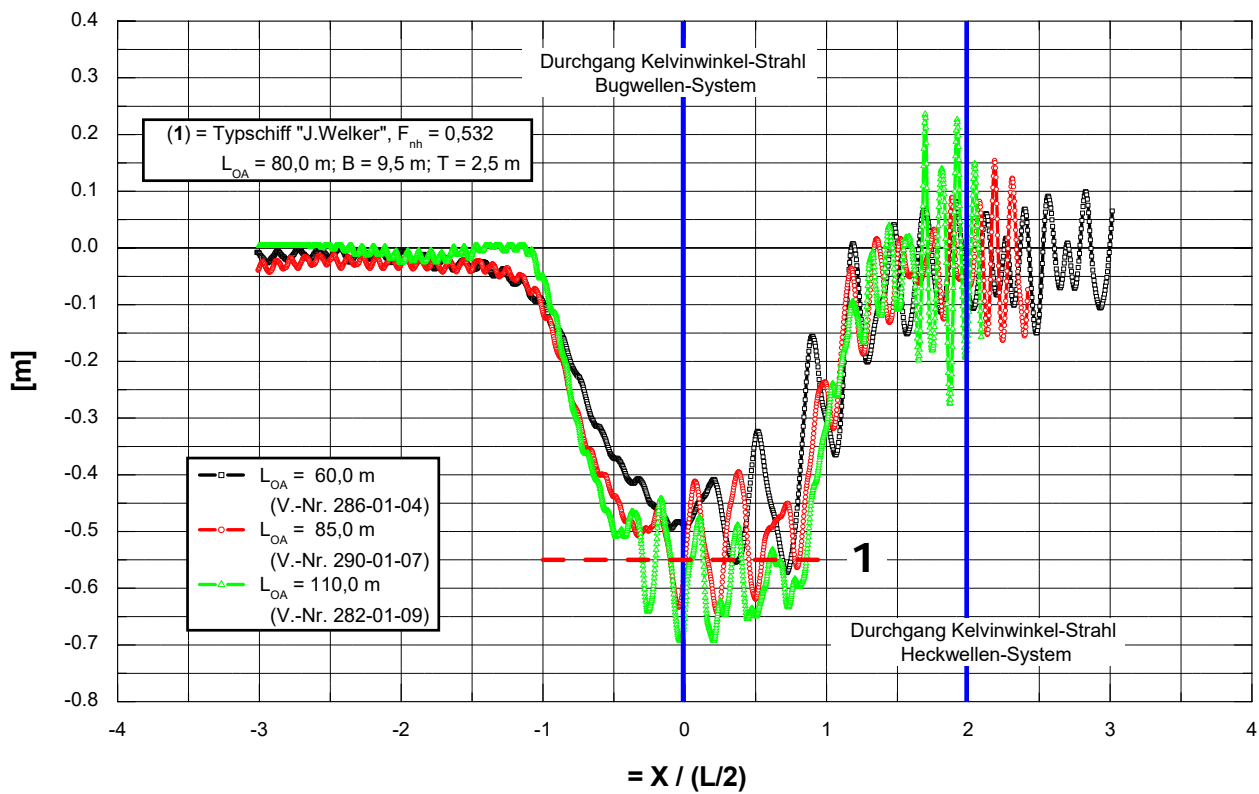
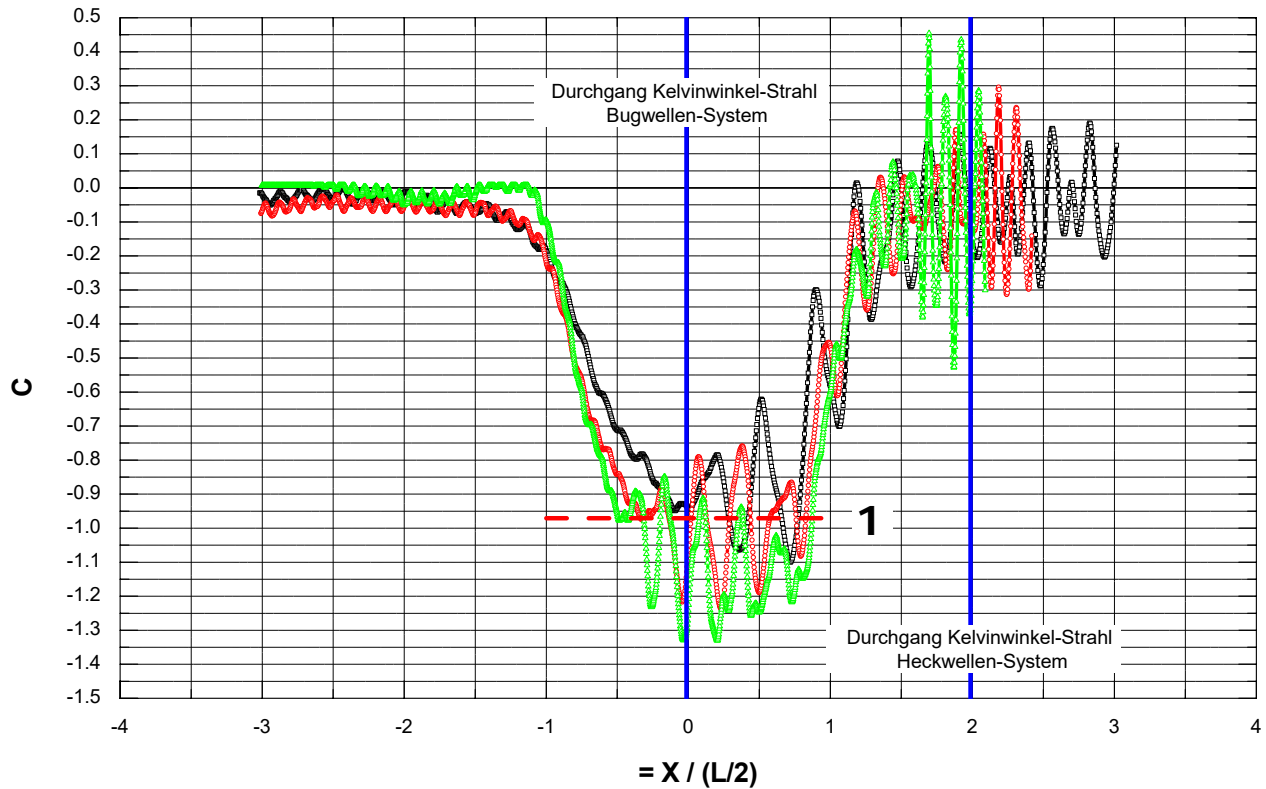
Messung im Modell-Kanal, $b_c \times h = 42,0 \times 4,0$ m

- Hochgerechnete und dimensionslose Darstellung -

Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6)

L-Variation, $B = 11,40$ m; $T = 2,8$ m

$$F_{nh} = 0,510 = \text{konst.}$$



Vergleich Semikatamaran - Einrumpfschiff

Bodendruck-Längsschnitt **Mitte Schiff** ($2Y/b_c = 0$)

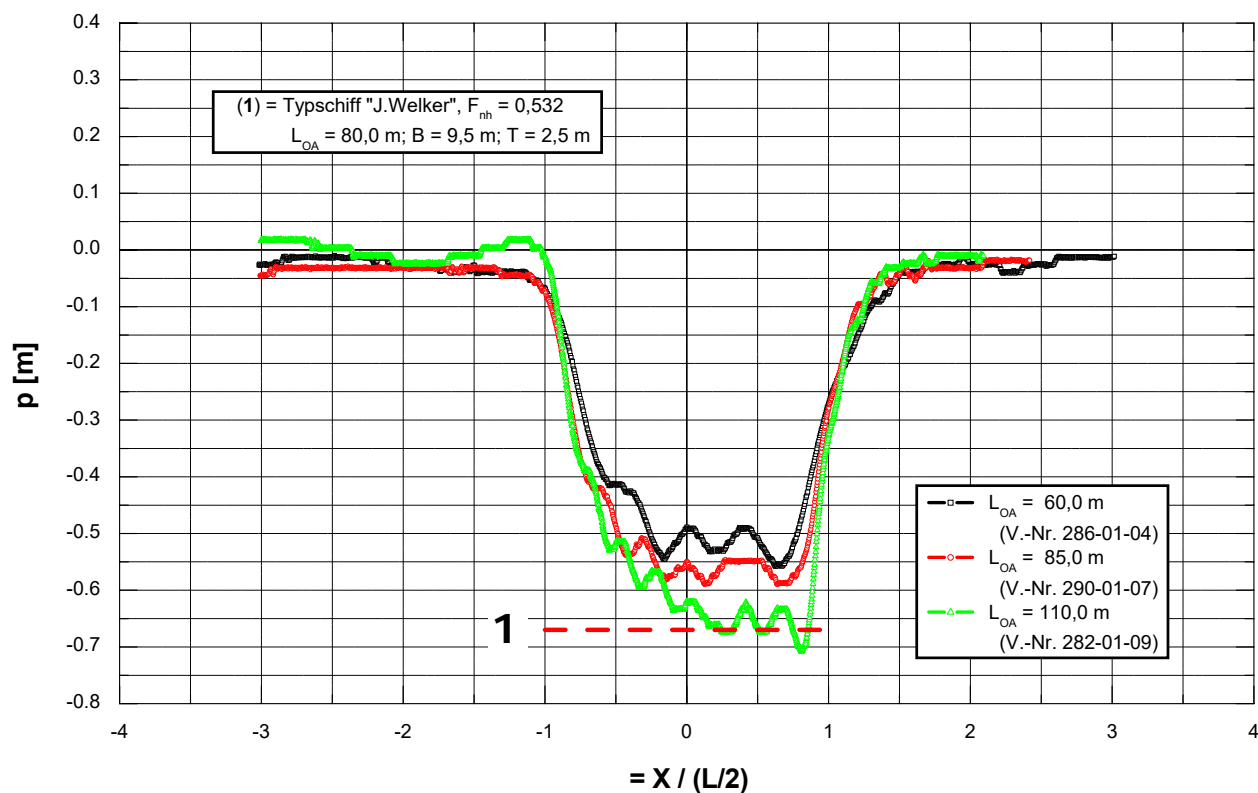
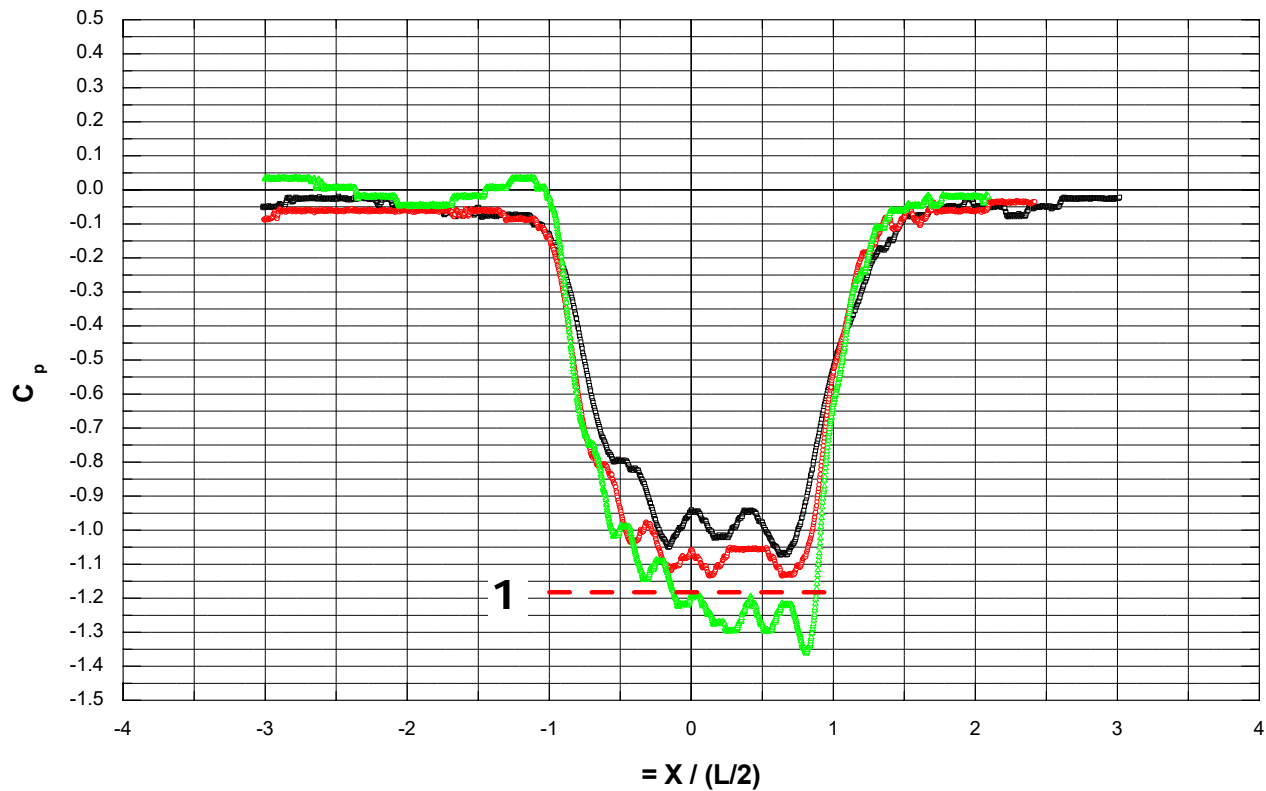
Messung im Modell-Kanal, $b_c \times h = 42,0 \times 4,0$ m

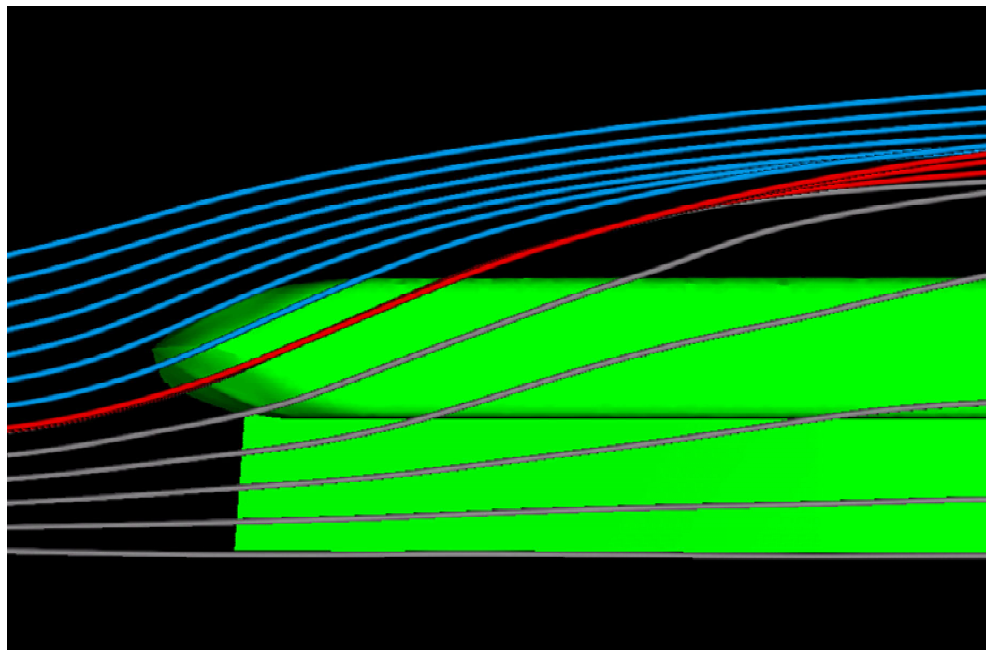
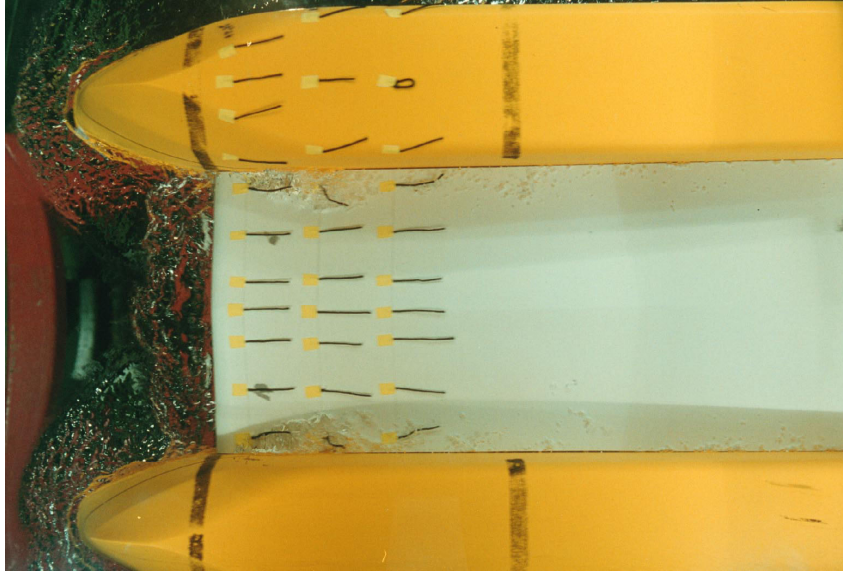
- Hochgerechnete und dimensionslose Darstellung -

Semikat. (Kanalschiff, Formvar. 6)

L-Variation; $B = 11,40$ m; $T = 2,8$ m

$F_{nh} = 0,510 = \text{konst.}$

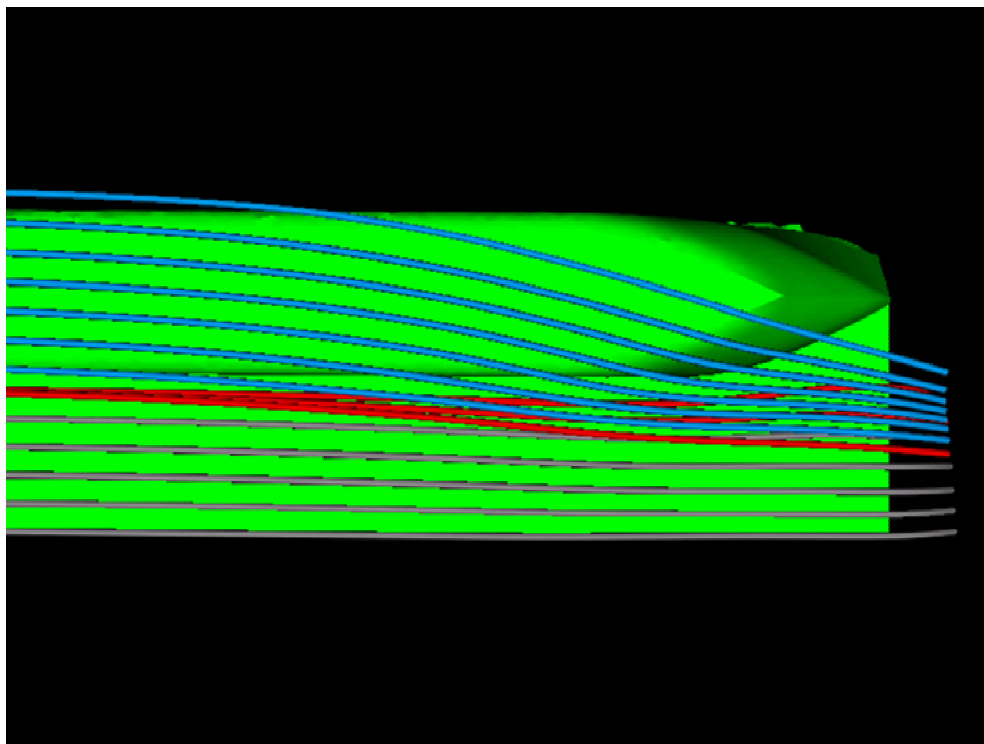
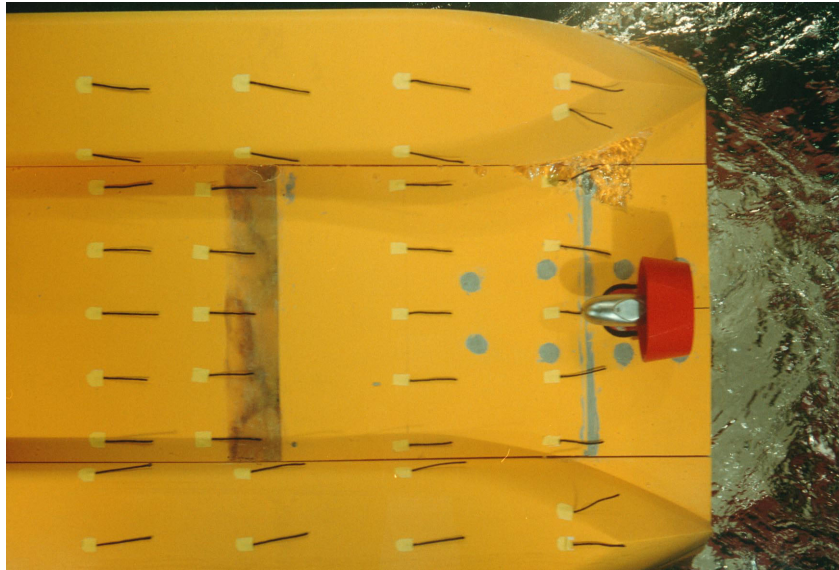




Stromlinien in Körpernähe
Vergleich CFD-Rechnung - Wollfadenversuch

Bugteil KANALSCHIFF, Seitenrumpfoptimierung
Ausgangsvariante (Formvar. 3) - SR symmetrisch

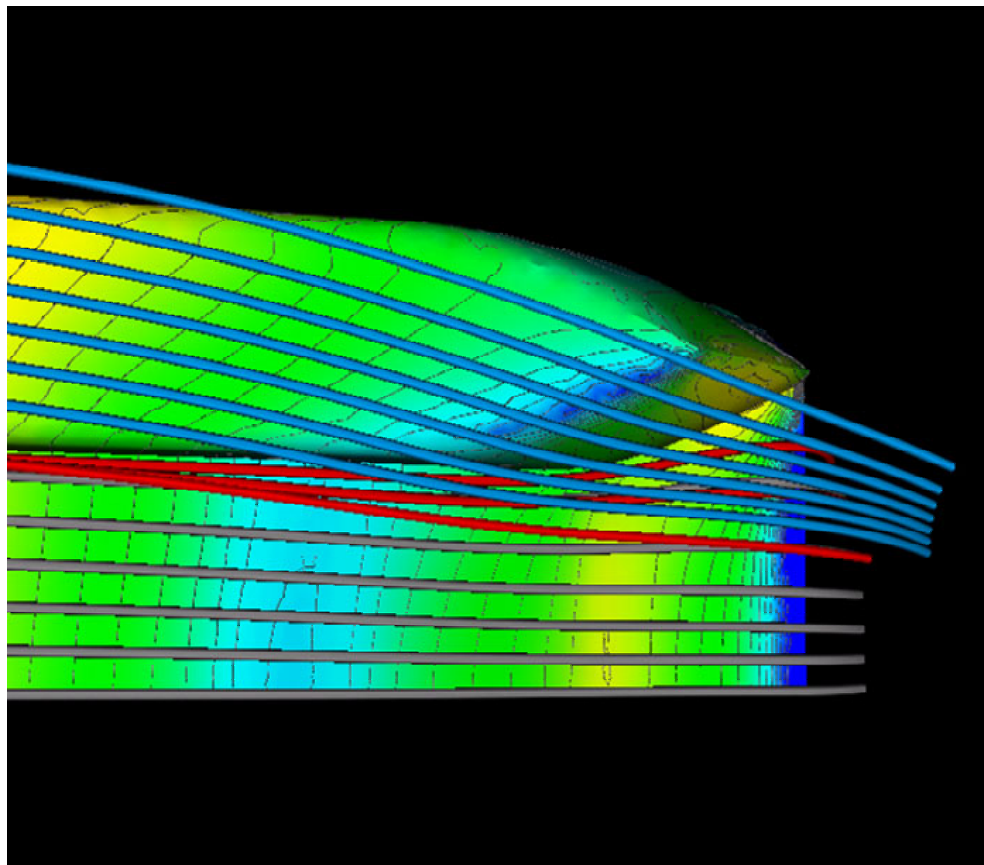
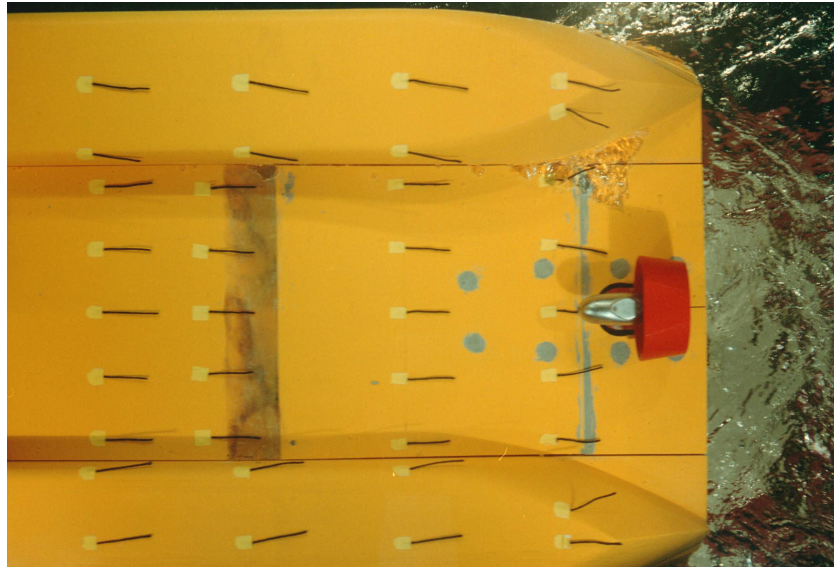
$h = 4,0 \text{ m}$, $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$, $B = 11,4 \text{ m}$, $T = 2,8 \text{ m}$, $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$



Stromlinien in Körnernähe
Vergleich CFD-Rechnung - Wollfadenversuch

Heckteil KANALSCHIFF, Seitenrumpfoptimierung
Ausgangsvariante (Formvar. 3) - SR symmetrisch

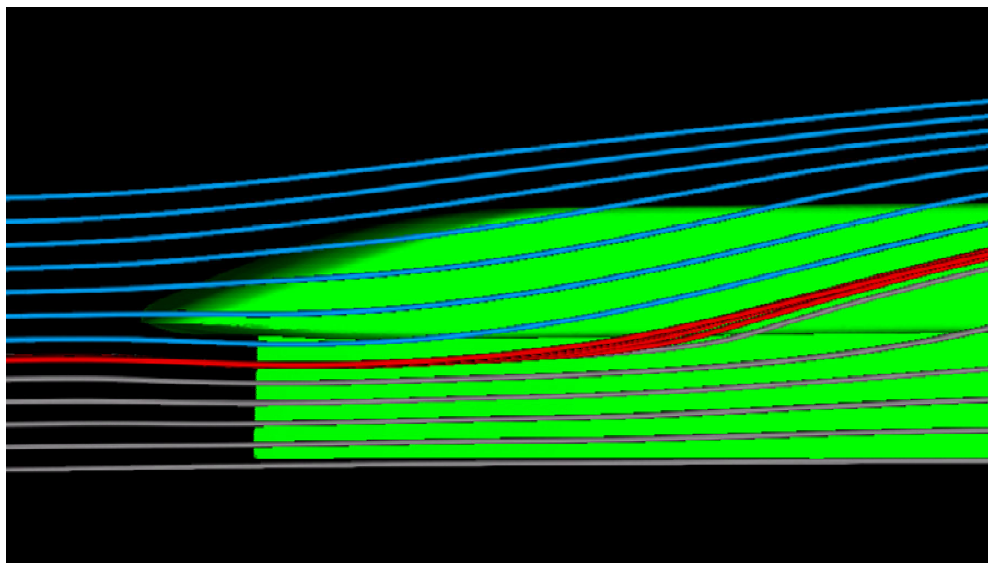
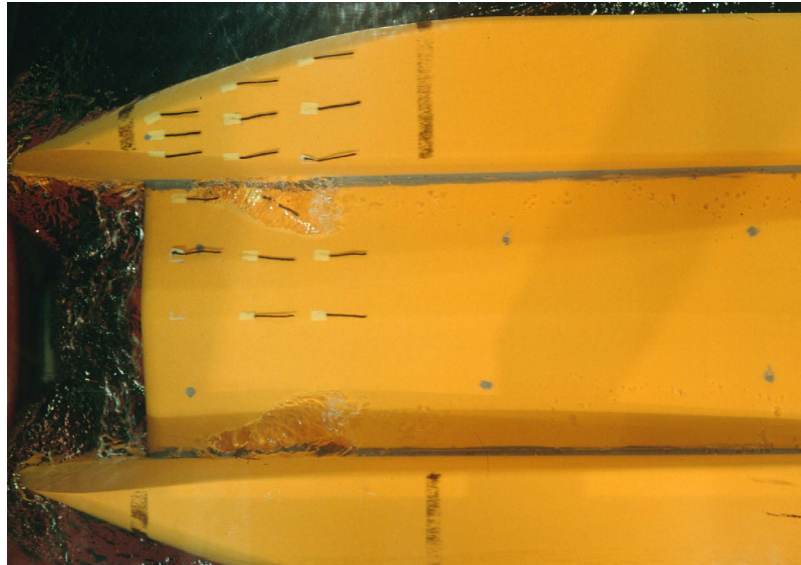
$h = 4,0 \text{ m}$, $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$, $B = 11,4 \text{ m}$, $T = 2,8 \text{ m}$, $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$



Stromlinien in Körnernähe, Druck an der Außenhaut
Vergleich CFD-Rechnung - Wollfadenversuch

Heckteil KANALSCHIFF, Seitenrumpfoptimierung
Ausgangsvariante (Formvar. 3) - SR symmetrisch

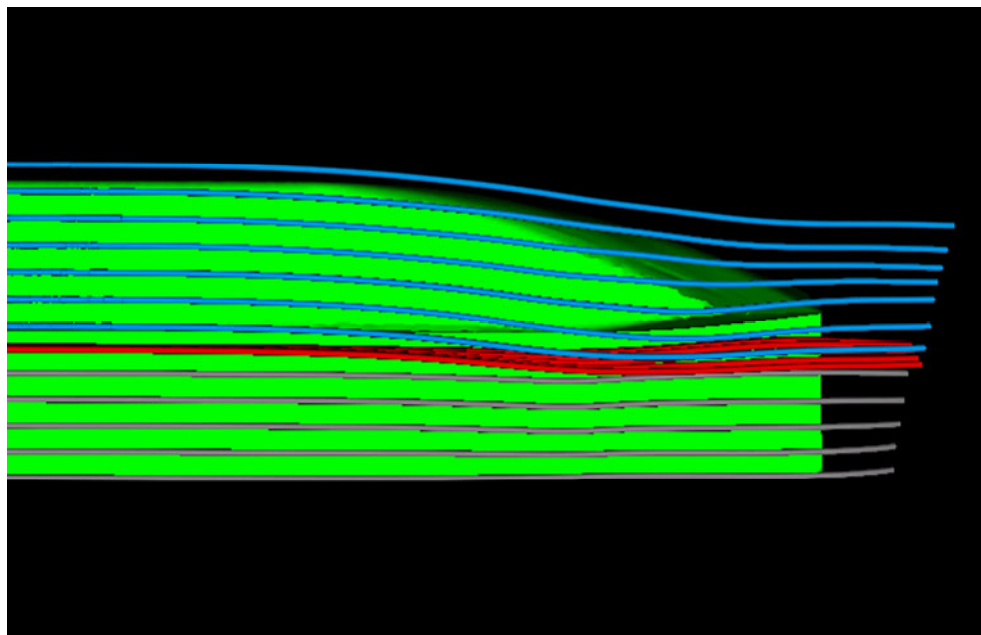
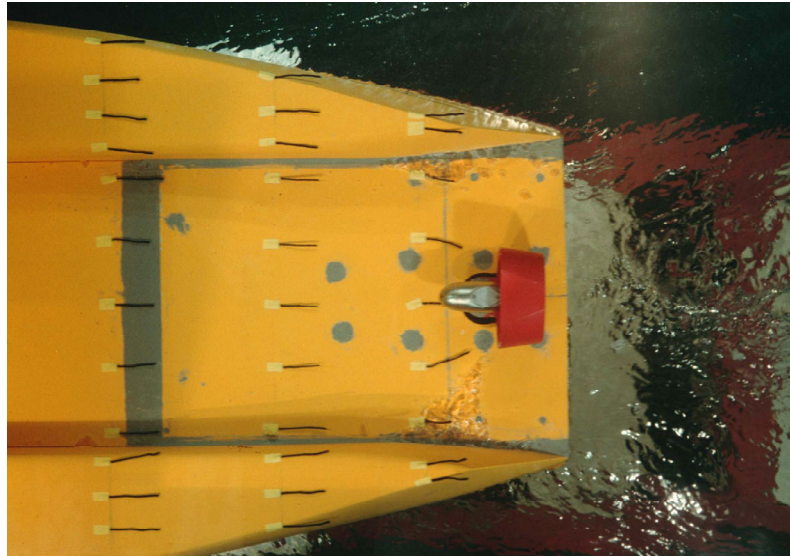
$h = 4,0 \text{ m}$, $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$, $B = 11,4 \text{ m}$, $T = 2,8 \text{ m}$, $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$



Stromlinien in Körnernähe
Vergleich CFD-Rechnung - Wollfadenversuch

Bugteil KANALSCHIFF, Seitenrumpfoptimierung
Endvariante (Formvar. 6) - SR asymmetrisch, innen gerade

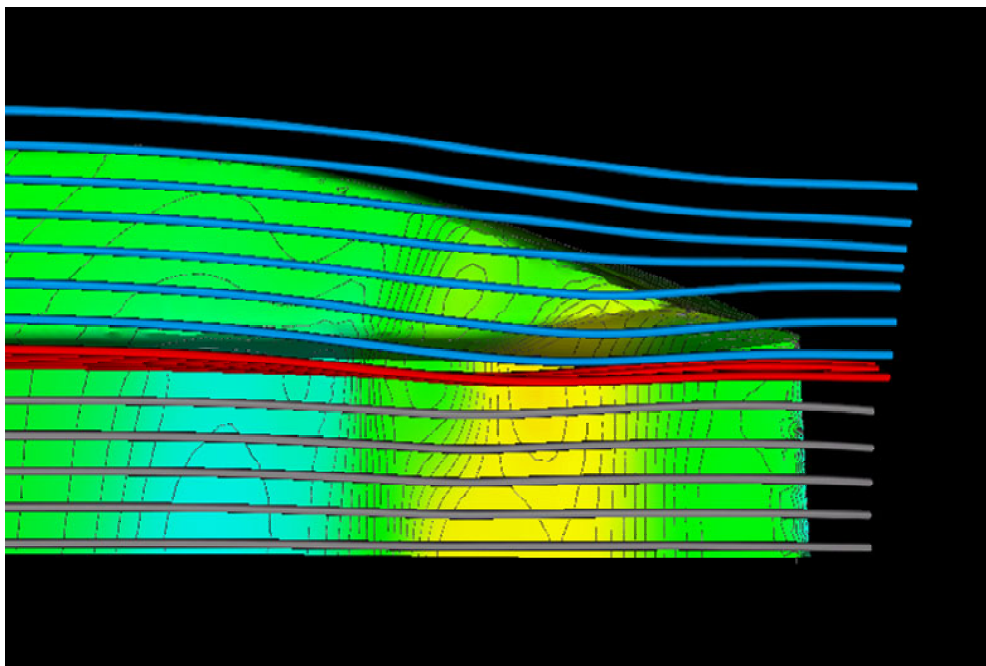
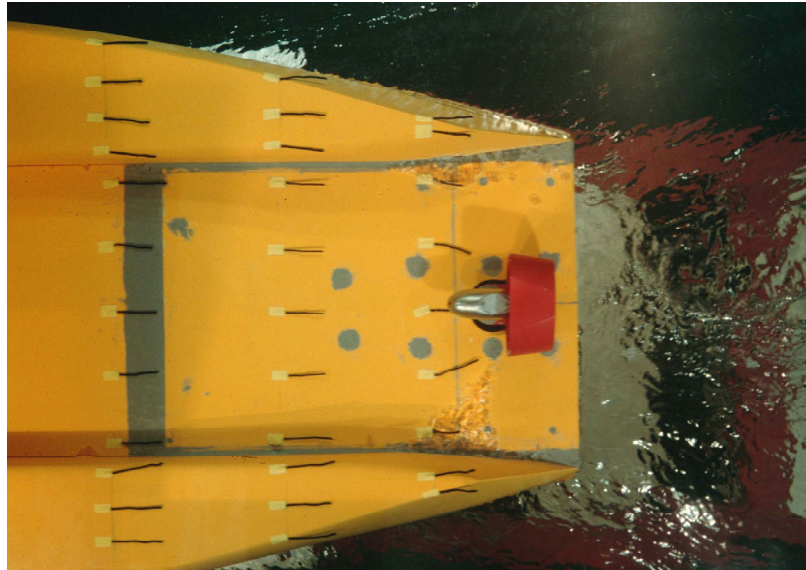
$h = 4,0 \text{ m}$, $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$, $B = 11,4 \text{ m}$, $T = 2,8 \text{ m}$, $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$



Stromlinien in Körnernähe
Vergleich CFD-Rechnung - Wollfadenversuch

Heckteil KANALSCHIFF, Seitenrumpfoptimierung
Endvariante (Formvar. 6) - SR asymmetrisch, innen gerade

$h = 4,0 \text{ m}$, $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$, $B = 11,4 \text{ m}$, $T = 2,8 \text{ m}$, $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$



Stromlinien in Körnernähe, Druck an der Außenhaut
Vergleich CFD-Rechnung - Wollfadenversuch

Heckteil KANALSCHIFF, Seitenrumpfoptimierung
Endvariante (Formvar. 6) - SR asymmetrisch, innen gerade

$h = 4,0 \text{ m}$, $L_{OA} = 85,0 \text{ m}$, $B = 11,4 \text{ m}$, $T = 2,8 \text{ m}$, $h_{MR} = 1,0 \text{ m}$